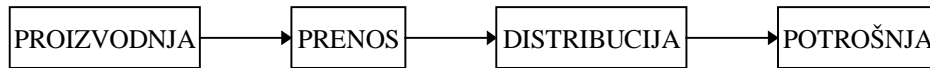


1. Uvod u analizu elektroenergetskih sistema

Elektroenergetski sistem (EES) se opisuje kao složeni, dinamički sistem velike dimenzionalnosti, čija je prevashodna funkcija da sigurno, pouzdano i ekonomično snabdeva potrošače sa dovoljnim količinama kvalitetne električne energije. Sa aspekta osnovne tehnološke funkcije EES se deli na sledeće podsisteme: proizvodni, prenosni, distributivni i potrošački podsystem. Ovaj funkcionalni lanac je ilustrovan na sl. 1.1



Sl. 1.1 Funkcionalna veza podsistema u EES

Imajući u vidu polaznu definiciju EES, kao i metodološku osetljivost njegovog proučavanja, indirektno se zaključuje da se u njemu istovremeno sadrže i principi bazičnosti (kroz potrebe za energijom) i principi savremenosti (kroz stalne potrebe za unapređenjem tehnologija), i kroz njihovu komplementarnu primenu uspešno se mogu rešavati složeni zadaci analize EES koji su posledica potreba pri planiranju i eksploataciji sistema. Atraktivnost proučavanja EES proizilazi upravo iz njegove čvrste oslonjenosti na realne životne potrebe (bazičnost) i na potrebu za primenom modernih naučnih i tehnoloških dostignuća (savremenost) u cilju uspešnog funkcionisanja ovog kompleksnog sistema.

EES je objektivno jedan od najsloženijih, ako ne i najsloženiji, tehnološki sistem koji poznaje današnja civilizacija. Ovi sistemi sa rastom interkonekcija prelaze granice pojedinih država i prerastaju u moćne kontinentalne sisteme. EES se dimenzioniše kako prema potrebama u energiji tako i prema potrebama u snazi i, s obzirom na velika kapitalna ulaganja koja zahteva izgradnja i eksploatacija elektroenergetskih kapaciteta, optimalnom dimenzionisanju i održavanju EES pridaje se veliki značaj.

Prvi i jedini razlog postojanja EES je podmirenje potreba potrošača za električnom energijom. Ove potrebe su široke i raznovrsne jer je električna energija najplemenitiji vid energije u prirodi. Argumenti koji idu u prilog ovoj konstataciji su njena fleksibilnost (u smislu lakog prilagođenja zahtevima konzuma), čistoća (u formi finalnog proizvoda), kontrolabilnost, jednostavnost i efikasnost konverzije u druge forme energije, ekološka prihvatljivost (ceo proces, kada ne bi bilo proizvodnje, bi bio sasvim ekološki prihvatljiv) i praktična nezamenljivost u mnogim visokim tehnologijama. S druge strane, električna energija ima i određene slabosti koje se manifestuju preko relativno skupe proizvodnje i preko teškoća prilikom njenog akumulisanja.

Električna energija učestvuje u značajnoj meri u podmirenju ukupnih energetske potreba. Ovo učešće varira od zemlje do zemlje u zavisnosti od strukture energetske resursa, i kreće se negde do 1/3 ukupnih potreba. Ako se električna energija koristi za grejanje prostorija tada je ovo učešće ovako visoko (primeri Norveške i Švedske). Kod zemalja koje su u energetskom smislu oslonjene na gas i naftu udeo električne energije u podmirenju ukupnih energetske potreba je ispod 10%.

U našoj zemlji taj udeo je iznosio oko 20% do 1990. godine, da bi već u 1995. godini usled uticaja sankcija na uvoz nafte i gasa i usled veoma niske cene električne energije (i u apsolutnom smislu i relativno prema drugim energentima) narastao na preko 35%. Optimalnim razvojem energetskog sektora taj udeo treba da se smanji na nivo primeren našim energetskim bogatstvima i našim potrebama, uz respektovanje energetske efikasnosti i realističnog razvoja privrede.

Do 1973. godine, svet je živeo u uverenju o jeftinoj energiji, pa i o jeftinoj električnoj energiji. Po izbivanju naftne krize tih godina menja se odnos prema energiji u razvijenom svetu i započinju procesi štednje i racionalizacije u oblasti kompleksne energetike.

1.1. Proizvodni podsystem

Prvi u lancu podsistema je proizvodni podsystem (elektrana ili električna centrala). U elektranama se nalazi "srce" EES - sinhroni generator - u kome se mehanička energija transformiše u električnu. Elektrane (izvori električne energije) imaju zadatak da u svakom trenutku zadovolje potrebe potrošača za električnom energijom i da obezbede neophodan nivo rezerve za slučaj ispada pojedinih kapaciteta ili za slučaj nepredviđenih zahteva od strane potrošača. U osnovi postoje tri dominantna načina proizvodnje električne energije: proizvodnja u hidroelektranama, u termoelektranama i u nuklearnim elektranama. Suštinska razlika između njih je u formi primarne energije iz koje se proizvodi mehanička energija koja se kasnije transformiše u električnu.

Proizvodnja električne energije u hidroelektranama (HE) predstavlja klasičan način produkcije u kome se potencijalna energija primarnog energetskeg resursa (vode) pretvara pomoću hidroturbine u mehaničku energiju, a zatim hidrogenerator mehaničku energiju konvertuje u finalni proizvod na izlazu, tj. u električnu energiju. Hidrogeneratori se odlikuju relativno malim brzinama obrtanja (tako npr. u HE "Đerdap" I broj obrtaja hidroagregata je 71,50 o/min koji daju učestanost od 50 Hz sa 42 para polova) što je posledica većeg broja pari polova. S druge strane male brzine obrtanja uslovljavaju velike obrtne momente pa su hidrogeneratori mašine visoke tehnološke složenosti. Hidrogeneratori su mašine sa istaknutim polovima koje se proizvode u veoma širokom opsegu snaga, od nekoliko desetina kW do nekoliko stotina MW. Specifičnost hidrogeneratora sastoji se u činjenici da su na svakom vodotoku zahtevi u pogledu performansi hidroturbina i hidrogeneratora drugačiji tako da se praktično ne može govoriti o serijskoj proizvodnji ovih mašina. Performanse hidroelektrana zavise od protoka vode, od ukupne raspoložive količine vode na godišnjem horizontu (moguća godišnja proizvodnja hidroelektrana), od raspoloživog pada i od raspodele vode tokom godine. Hidroelektrane se prema vremenu pražnjenja akumulacionog bazena dele na protočne i na akumulacione (sa

sedmičnom, sezonskom, godišnjom i višegodišnjom akumulacijom). Glavni tipovi hidroturbina su Francisove (za srednje padove), Kaplanove (za relativno male padove) i propelerne (takođe za male padove, ali za vodotoke sa konstantnim padom). Ova tri tipa su predstavnici reakcionih turbina kod kojih se potencijalna energija vode pod pritiskom samo delimično pretvara u kinetičku. Peltonove turbine su predstavnici akcionih hidroturbina kod kojih se sva potencijalna energija vode pretvara u kinetičku (prilagođene su vodotocima sa velikim padom). Dve ključne fizičke veličine koje opredeljuju rad hidrauličkih postrojenja su pad i protok i u cilju njihovog optimalnog iskorišćenja pažljivo se mora vršiti projektovanje i eksploatacija hidroelektrana. Hidrogeneratori se proizvode sa vratilima postavljenim vertikalno i horizontalno i naravno, sa odgovarajućim hidroturbinama. Poseban tip hidrogeneratora su tzv. kapsulni hidrogeneratori kod kojih se u kapsuli potopljenoj u vodi nalaze i hidroturbina i generator. Ovakve se konstrukcije koriste na manjim padovima i obično za snage agregata do 50 MW, npr. HE “Đerdap” II. Lokacija hidroelektrana diktirana je raspoloživošću vodnih potencijala i vrlo je česta pojava da su hidroelektrane udaljene od glavnih centara potrošnje, a što za posledicu ima povećane zahteve u odnosu na prenosnu mrežu. U EES Srbije iz hidroelektrana se u poslednjih nekoliko godina proizvodi negde oko trećina godišnje proizvodnje električne energije sa tendencijom smanjivanja učešća. Kvalitetni vodni potencijali su uglavnom iskorišćeni (izuzev Drine) i novi elektroenergetski izvori mogu se eventualno očekivati u okviru rešavanja širih problema vodosnabdevanja (formiranje akumulacija) ili preko izgradnje malih hidroelektrana. Generalno se može konstatovati da je izgradnja hidroelektrana investiciono veoma skup posao ali je njihova eksploatacija, s obzirom da je primarni energetske resurs (voda) besplatan, znatno ekonomski isplativija nego eksploatacija termoelektrana. Glavni hidroenergetski kapaciteti u našem sistemu su locirani na Dunavu (HE “Đerdap” I sa snagom 6×176 MW i HE “Đerdap” II sa snagom 8×27 MW), zatim na Drini (HE “Bajina Bašta” sa snagom 4×91 MW, RHE “Bajina Bašta” sa snagom 2×310 MW u pumpnom režimu i 2×307 MW u generatorskom režimu i HE “Zvornik” sa snagom 4×24 MW), na Limu i pritokama (HE “Bistrica” sa snagom 2×51 MW, HE “Kokin Brod” sa snagom 2×11 MW, HE “Potpeć” sa snagom 3×18 MW i HE “Uvac” sa snagom 36 MW), i na Vlasini (HE “Vrla” I, II, III i IV) sa ukupnom snagom od 129 MW. Pored ovih treba pomenuti HE “Zavoj” kod Pirota sa 2×40 MW i PAP “Lisinu” od 30 MW. Ostali kapaciteti su znatno manjih snaga (“Ovčar Banja”, “Međuvršje”, “Gazivode”,...) i nisu od posebnog značaja za sistem kao celinu. Sa RHE je označena reverzibilna hidroelektrana čija je uloga da proizvodi vršnu snagu i energiju u sistemu u periodima maksimalnog opterećenja sistema, a da u periodima sa viškovima električne energije (noćni režimi u kojima je neekonomično isključivati velike termoagregate) u pumpnom režimu puni svoje akumulaciono jezero. Sa PAP je obeleženo pumpno-akumulaciono postrojenje koje ima istu namenu kao i RHE, ali sa bitnom razlikom u smislu da ovo postrojenje nema mogućnost rada u generatorskom režimu. Tako npr. PAP “Lisina” isključivo pumpa vodu u akumulaciono jezero Vlasinskih HE.

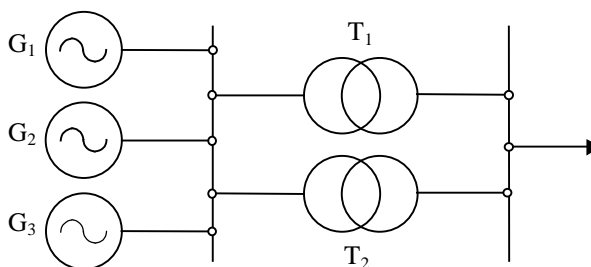
Proizvodnja električne energije u termoelektranama bazira se na fosilnim gorivima (ugalj, nafta, gas). Kod nas se proizvodnja u termoelektranama odvija zahvaljujući raspoloživosti niskokaloričnih lignita (kolubarski, kosovski i kostolački basen). Oko 2/3 od ukupno proizvedene električne energije kod nas proizvodi se u termoelektranama. Glavni naš proizvođač je termoelektrana “Nikola Tesla” (TENT) u Obrenovcu koja koristi kolubarski lignit. Potrebe za vodom uslovile su lokaciju na reci Savi a blizina beogradskog regiona kao velikog potrošačkog centra doprinela je da su se ovde spojile tri pogodnosti za izgradnju termoelektrane: ugalj, voda i veliki potrošač. U TENT-A instalirano je 6 agregata sa snagama 2×210 MW, 1×305 MW i $3 \times 308,5$ MW, dok su u TENT-B instalirana 2 agregata snage 2×620 MW. Ukupno se na ove dve lokacije proizvede gotovo polovina električne energije u EES Srbije. Naredne termoelektrane po snazi su kosovske elektrane sa snagom od 800 MW u “Kosovu” A (1×65 MW, 1×125 MW, 2×200 MW i 1×210 MW) i snagom od 678 MW (2×339 MW) u “Kosovu” B. Zatim slede “Kostolac” A sa 310 MW (1×100 MW i 1×210 MW) i “Kostolac” B sa 2×348 MW, “Kolubara” sa snagom od 271 MW (5 agregata), “Morava” sa snagom 125 MW i sve uticajnije termoelektrane-toplane (TE-TO) i industrijske energane u Beogradu, Novom Sadu, Zrenjaninu, Sremskoj Mitrovici itd.

Najčešće tehnološko rešenje koje se sreće u praksi, a koje je u vezi sa osnovnom funkcionalnom šemom termoelektrana, je tzv. blok-veza (veza jedan na jedan) prikazana na sl. 1.2 u kojoj su ključni elementi termoelektrane povezani redno (pod agregatom se podrazumeva blok veza turbina - generator).



Sl. 1.2 Blok veza elemenata TE

Pored blok veze moguća je i tzv. sabirnička veza prikazana na sl. 1.3 kod koje je kao ilustracija pretpostavljeno da 3 generatora (G_1 , G_2 i G_3) rade preko električnih sabirnica sa 2 transformatora (T_1 i T_2). Slično rešenje je moguće i preko sabirnica pare kada npr. tri kotla rade preko dve turbine.



Sl. 1.3 Sabirnička veza elemenata EES

U kotlu se dobija para visokog pritiska i temperature, koja se dalje uvodi u parnu turbinu (u praksi se najpre uvodi u turbinu visokog pritiska, pa zatim u turbinu srednjeg pa onda niskog pritiska, kako bi se uvećala efikasnost). Stepenn korisnosti parne turbine je osetno povoljniji pri višim brzinama pa se zato turbogeneratori izvode sa cilindričnim tj. valjkastim rotorom (da bi se smanjile centrifugalne sile) i po pravilu su dvopolne (sa 3000 ob/min pri učestanosti od 50 Hz) a ređe četvorpolne mašine. Na kraju redne veze nalazi se transformator za podizanje napona. Potreba za višim prenosnim naponima je posledica zahteva za smanjenjem gubitaka, odnosno potreba za efikasnijim prenosom električne energije udaljenim potrošačima.

Kod termoelektrana važan pokazatelj rada je rezultatni koeficijent iskorišćenja η , koji se računa sumarno od ulaza energije u kotao do izlaza energije iz generatora, a koji pokazuje koliko se latentne hemijske energije uglja konvertuje u električnu energiju. Ovaj stepenn iskorišćenja je relativno nizak (kod najefikasnijih termoelektrana ide do 39%) i grubo se može smatrati da je on nešto iznad jedne trećine ($\eta > 1/3$). Termodinamičko ograničenje je Carno-ov ciklus (teorijski maksimalni koeficijent Carno-ovog ciklusa je $\eta_{max} = 62\%$, ali kod praktičnih realizacija parne turbine njegova gornja granica je oko 47%). Uzimajući da je koeficijent iskorišćenja kotla oko 88% (konverzija hemijske energije u toplotnu) i da je koeficijent iskorišćenja generatora 99% dolazi se do rezultatnog iskorišćenja od 41%, što je objektivno gornja granica kojoj termoelektrane teže. U našim termoelektranama, koje sagorevaju ugalj nižeg kvaliteta, sva iskorišćenja viša od 33% mogu se smatrati uspešnim. Poenta je, dakle, da se gotovo 2/3 energije kod termoelektrana gubi kroz otpadnu toplotu. Iz tih razloga se u poslednje vreme sve više grade kombinovana postrojenja za proizvodnju i toplotne i električne energije (termoelektrane-toplane ili termoelektrane sa kombinovanim ciklusom) kod kojih se rezultatni stepenn iskorišćenja može podići i do 2/3.

Turbogeneratori se proizvode u velikom rasponu snaga a kod nas u sistemu prisutne su snage počev od 10 MW pa do 620 MW, a u svetu su najveći generatori snaga čak do 1500 MW. Razlozi zašto se teži jedinicama većih snaga nalaze se u šire poznatom efektu veličine, prema kome je cena po jednom instalisanom kVA manja ako se prelazi na veće snage. Generatori najvećih snaga hlade se tečnim vodonikom ili vodom kako bi se iz manje zapremine uspele izvući veće snage. Naponi na kojima rade turbogeneratori se kreću od 1 do 25 kV. Viši naponi se ne koriste zbog ograničenja koja nameću izolacioni materijali.

Isto tako treba ukazati na negativne ekološke aspekte rada termoelektrana. Eksploatacija i transport uglja, sagorevanje uglja i deponovanje pepela kao i povišenje temperature vode u okolnim vodotocima u koje se izliva otpadne vode, predstavljaju izvore zagađenja okoline (vazduha, vode i zemlje) o kojima se mora voditi računa. Dugoročno posmatrano pojave kiselih kiša i efekta staklene bašte takođe su u direktnoj vezi sa produktima sagorevanja fosilnih goriva u termoelektranama. Iz tih razloga se u razvijenim zemljama, a takođe i kod nas, ograničavaju količine polutanata (kao što su CO₂, NO_x i ugljena prašina) koje se izbacuju iz dimnjaka termoelektrana u atmosferu. Uređaji kojima se ovo postiže su razni tipovi elektrofiltarskih postrojenja.

Pored termoelektrana kod kojih je pogonska mašina parna turbina, postoje i termoelektrane kod kojih je pogonska mašina gasna turbina i termoelektrane čije generatore pokreću motori sa unutrašnjim sagorevanjem (najčešće dizel motori). Gasnoturbinske termoelektrane postaju sve značajnije poslednjih godina zbog manjih investicionih ulaganja po jedinici snage i zbog raspoloživosti tečnih i gasovitih fosilnih goriva. Radni fluid kod njih je vrela gas. Rezultatni stepenn iskorišćenja je od 30 do 35% i on se podiže kroz postupak rekuperacije toplote izduvnih gasova (kombinovana proizvodnja električne i toplotne energije). Ove termoelektrane se lako stavljaju u pogon, brzo opterećuju i rasterećuju i koriste se obično za pokrivanje vršnih opterećenja sistema.

Proizvodnja električne energije u nuklearnim elektranama bazira se na kontrolisanoj nuklearnoj fisiji. Fisijom se generiše toplota koja se u reaktoru predaje nekom od rashladnih medijuma (najčešće voda), zatim se, kod nekih tipova reaktora, već u njemu proizvodi para. Nadalje je sve isto kao kod termoelektrana, samo se kod nuklearnih elektrana ima reaktor umesto kotla. Pored toga temperature pare su kod nuklearnih elektrana niže tako da je termodinamički koeficijent iskorišćenja takođe niži nego kod termoelektrana. Međutim, glavna negativna strana ostaje visok rizik u akcidentnim situacijama kada se javljaju radijacioni efekti čije negativne posledice još nisu dovoljno dobro istražene. Iz tog razloga zahtevi za pojačanim stepenom sigurnosti nuklearnih elektrana direktno podižu investicione i eksploatacione troškove. U našem EES nema izgrađenih nuklearnih elektrana.

Razvoj proizvodnje električne energije u svetu prikazan je u tabeli 1.1 za period od 1920. do 1995. godine. Uočavaju se umerene stope rasta proizvodnje električne energije do II svetskog rata i gotovo zakonomernost udvostručenja proizvodnje na horizontu od 10 godina (godišnja stopa rasta 7,2%) posle II svetskog rata. Ovako visoke stope rasta su ublažene u poslednjih 20 godina i imaju tendenciju daljeg ublažavanja.

Tabela 1.1 Proizvodnja električne energije u svetu (TWh)

1921.	1928.	1938.	1950.	1955.	1960.	1965.	1970.	1975.	1980.	1985.	1990.	1995.
99	290	464	959	1544	2300	3380	4956	6519	8239	9738	11774	13098

Treba ukazati da postoje i druge tehnologije za proizvodnju električne energije kao i drugi energetski resursi. Posebno raste uticaj energije vetra i fotovoltaičnih generatora (primena solarne energije), biomase i geotermalne energije. Treba pomenuti i magnetohidrodinamičke generatore, a takođe i energiju plime i oseke, energiju otpadnih materija i slične alternativne izvore energije. Glavna osobina mnogih od ovih izvora je geografska razudnost i relativno mali iznosi raspoložive energije. Iz tog razloga posebno se mora voditi računa o uklapanju ovih izvora u EES. Ukupan doprinos svih ovih izvora na globalnom planu u proizvodnji električne energije je reda procenta (sa prognozama do 6% u 2020. godini) i zato se ovim izvorima pridaje pažnja samo u specijalističkim knjigama, odnosno oni su još uvek izvan tzv. velike energetike. Ovde je važno ukazati na još jednu važnu podelu energetskih izvora. Po toj podeli svi izvori se dele na obnovljive (hidro resursi, sunčeva energija, energija vetra, plime i oseke, geotermalna energija i biomasa) i na neobnovljive izvore (fosilna i nuklearna goriva). Nesporno je da obnovljivi izvori imaju višestruke prednosti i zato su definitivno prioritet kod planiranja razvoja energetike.

Činilo se da je budućnost proizvodnje električne energije idealno sagledavati u unapređenju tehnologija kontrolisane fuzije. Međutim ukoliko se optimistički scenariji u pogledu ovladavanja fuzijom pokažu nerealnim, tada će se pored unapređenja i maksimalnog iskorišćenja klasičnih energetskih resursa (obnovljivih i neobnovljivih) verovatno morati pribeci proizvodnji električne energije iz tehnološki usavršenijih i po okolinu bezbednijih nuklearnih elektrana.

Sušтина strategije dobre energetske politike svodi se danas u razvijenim zemljama na usklađenost efikasnosti, ekonomičnosti i ekološke prihvatljivosti u cilju uspostavljanja ravnoteže između rastućih energetske potreba i sve manjih rezervi primarnih energenata. Dakle, na dužem vremenskom horizontu radi se o objektivizaciji ponude i tražnje u energetske sektoru sa definisanjem dugoročno usklađenog i realističnog (održivog) razvoja energetike, a u njenom okviru onda i elektroenergetike. Visoka uvozna zavisnost naše zemlje u pogledu ukupnih energetske potreba (oko 40%) čini ovaj problem još osjetljivijim u našim planerskim zadacima. Udeo elektroenergetike u ukupnoj energetici treba da se određuje na bazi optimalnog iskorišćenja naših domaćih resursa uz respektovanje ograničenja koja nameće svetsko tržište energenata, odnosno uz strogo uvažavanje ekonomskih zakonomernosti.

1.2. Prenosni i distributivni podsistem

Naredna dva tehnološka podsistema su prenosni i distributivni podsistem, čiji je zajednički zadatak da električnu energiju prenese od izvora do potrošača. U svetu danas egzistiraju dva tipa električnih mreža, i to mreže naizmenične i mreže jednosmerne struje. Proizvodnja i potrošnja električne energije ostaju neprikosnovo, za sada, na trofaznom naizmeničnom naponu kao optimalnom načinu i produkcije i potrošnje električne energije sa aktuelnim tehnologijama. Zato su moderni elektroenergetski sistemi po pravilu trofazni, naizmenični sistemi. Međutim, osim naizmeničnom, prenos električne energije vrši se i jednosmernom strujom. Razlog je što prenos velikih snaga na velika rastojanja naizmeničnom strujom ispoljava određene slabosti u vezi sa problemima stabilnosti. Sistem je nestabilan kada neki od generatora ispadne iz sinhronizma. Kod prenosa jednosmernom strujom ovih problema nema. Na savremenom nivou razvoja ispravljačkih postrojenja pokazuje se da je za rastojanja do 500 km naizmenična struja superiornija a preko 700 km prenos jednosmernom strujom je ekonomičniji. U zoni prenosa od 500 do 700 km ova dva tipa prenosa su ravnopravna. Važno je ukazati da u sistemima u kojima postoje dalekovodi sa jednosmernim naponom proizvodnja i potrošnja i dalje ostaju na naizmeničnom naponu, samo se na početku dalekovoda struja prevodi iz naizmenične u jednosmernu a na kraju obratno. Ova prevođenja se rade u moćnim postrojenjima opremljenim uređajima energetske elektronike. U našem EES (s obzirom na rastojanja koja treba savladati) prenos električne energije vrši se isključivo na naizmeničnom naponu učestanosti 50 Hz.

Povezivanje EES-a međusobno vrši se na nivou prenosnih mreža tako da se preko međupoveznih vodova formiraju elektroenergetske interkonekcije koje imaju tendenciju stalnog narastanja. Razlozi za prelaz na interkonektivni rad su pre svega smanjivanje potrebne rezerve (u relativnom iznosu) u sistemu i povećanje sigurnosti snabdevanja potrošača. Pored toga, maksimalna snaga sistema kao celine (koju potrošači u jednom trenutku zahtevaju) manja je od zbira maksimalnih snaga njegovih pojedinih delova (nejedновременi maksimumi delova). Pored ovoga stižu se povoljniji uslovi za eksploataciju složenih hidro-termo sistema u smislu smanjivanja troškova po proizvedenom kWh i konačno omogućuje se ugradnja velikih jedinica u sistem, koje su rentabilnije (kod manjih sistema je često aktuelno empirijsko ograničenje da snaga najvećeg agregata ne treba da prelazi 5% maksimalne snage sistema).

Pojmovi prenosna mreža (prenosni podsistem) i distributivna mreža (distributivni podsistem) mogu se razlikovati tako što su u prenosnim mrežama tokovi snaga u vodovima u principu promenljivi, dok je kod distributivnih mreža smer snage (energije) nepromenljiv i uvek je ka potrošaču. Važna karakteristika mreže je njen naznačeni (nominalni), odnosno nazivni napon. To je onaj napon za koji je data mreža, pa naravno i elementi te mreže, projektovana odnosno izvedena. Elektroenergetske mreže se standardizuju u pogledu napona kako bi se izbeglo šarenilo napona u sistemu i omogućila unifikacija opreme kao jedan od ključnih zahteva u modernoj industriji. Naime, prenos konkretne snage na konkretno rastojanje rezultuje nalaženjem nekog optimalnog napona prenosa tako da bi se za svaki novi dalekovod teorijski imao novi naponski nivo. Upravo zato Internacionalna elektrotehnička komisija (IEC) i nacionalni standardi daju preporuke u pogledu niza nominalnih i maksimalnih radnih napona (kad se govori o naponima podrazumeva se efektivna vrednost međufaznog napona).

U našem EES propisan je sledeći niz nominalnih napona u kV:

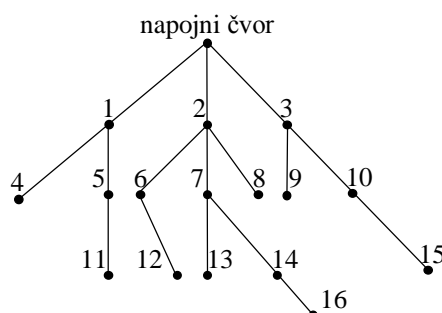
400; 220; 110; 35; 20; 10; 0,4.

Pri tome se u praksi javljaju varijante: 400; 220; 110; 35, 10; 0,4

zatim: 400, 220; 110; 20; 0,4

i konačno: 400; 220; 110; 10; 0,4.

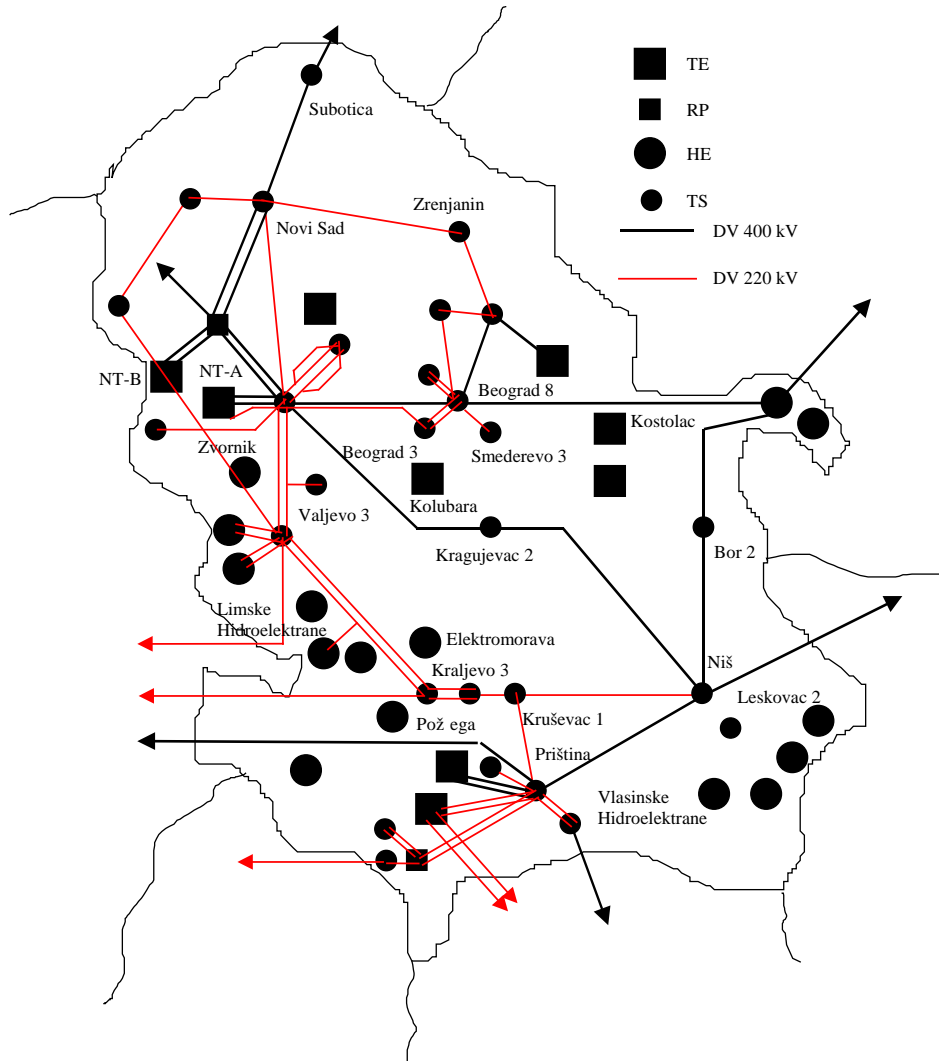
— ~~Hilustracije radi, niz maksimalnih radnih napona u kV, prema IEC preporukama, izgleda ovako: 12; 22; 33; 66; 123; 242; 275; 365; 420; 550; 765; 1200.~~



SI. 1.4 Primer radialne konfiguracije električne mreže

Pokazuje se da su mreže sa manjim brojem nominalnih napona, tj. sa većim odnosom susjednih nominalnih napona, znatno ekonomičnije. Detaljnije procene bazirane na postupcima tehničko-ekonomske analize pokazuju da je odnos susjednih napona od 1:3 gotovo uvek blizak optimalnom.

Oblik i način prostorne povezanosti elemenata jedne mreže zove se konfiguracija (topologija) mreže. Čvorovi te mreže su sabirnice postrojenja a grane su vodovi i transformatori. Mreže različitih napona su povezane interkonektivnim transformatorima. Elektrane se priključuju na mrežu posredstvom generatorskih transformatora. Konfiguracija mreže nije nikada idealna u geometrijskom smislu, pošto raspored potrošača nije ravnomeran. Odnosi susjednih nazivnih napona obično nisu optimalni jer su uzrokovani prethodnim razvojem mreže. Izvori energije su locirani uglavnom tako da prate primarne energetske resurse, a to znači daleko od idealne geometrije. Nadalje, zahtevi za rezervnim kapacitetima dovode do pojave dodatnih elemenata mreže te remete idealnu konfiguraciju. Iz svih tih razloga razvoj jedne mreže je obično parcijalan jer se mreža po pravilu gradi deo po deo.



Sl. 1.5 Primer petljaste konfiguracije mreže

Osnovne konfiguracije mreža su radijalne i prstenaste (petljaste). Kod radijalnih (ili kako se još nazivaju antenskih) konfiguracija napajanje se vrši samo sa jedne strane (u jednoj tački), kao što se vidi sa sl. 1.4 na kojoj je radi ilustracije prikazana struktura srednje-naponske gradske distributivne mreže (naponskog nivoa 10 ili 20 kV) manje rasprostranjenosti. Kod prstenastih mreža napajanje se vrši iz više tačaka kako je to pokazano na sl. 1.5 na kojoj je radi ilustracije skicirana prenosna 400 i 220 kV mreža u EES Srbije.

1.3. Potrošački podsistem

Poslednji podsistem u tehnološkom lancu je potrošački podsistem. Fizičke pojave u EES odvijaju se tako da se procesi proizvodnje i potrošnje dešavaju praktično istovremeno, pa se sve promene u potrošnji direktno reperkutuju na ostale podsisteme. Podsistem potrošnje je složena celina koju čini veliki broj raznorodnih prijemnika. Zahtevi ovog podsistema, ili kako se obično kaže, zahtevi konzuma su promenljivi kako u toku dana tako i tokom godine pa je EES dužan da praktično trenutno prati promene konzuma. Svi kapaciteti u EES moraju se dimenzionisati prema maksimalnom opterećenju (maksimalnoj snazi) konzuma koje traje veoma kratko (npr. 1 h u toku godine). Preostalo vreme sistem radi sa smanjenim opterećenjem i kvantitativna mera koja ukazuje koliko se efektivno koriste kapaciteti u sistemu na godišnjem nivou definiše se kao faktor opterećenja. To je količnik stvarno isporučene energije i maksimalno moguće energije koju bi sistem proizveo kada bi sve vreme radio sa maksimalnom snagom. Ovaj količnik ima u sistemima tipične vrednosti od 0,6 do 0,8. U našoj zemlji iznosio je preko 0,65 do 1990. godine da bi

se pogoršao do vrednosti oko 0,55 u poslednjim godinama zbog još izraženije sezonske neravnomernosti u potrošnji usled prelaska mnogih domaćinstava i ostalih potrošača na grejanje električnom energijom.

Planiranje razvoja elektroenergetskih kapaciteta uvek je vezano sa prognozom budućih potreba u električnoj energiji. Slično je i sa planiranjem razvoja i drugih energetske kapaciteta. Opšta zakonitost je da ekonomski rast zahteva uvećanje potreba u energiji što je s druge strane praćeno još nepovoljnijim uticajem na okolinu. Ova zakonitost je još validnija u korelaciji ekonomski rast - potrošnja električne energije. Nalaženje balansa u ovim relacijama je glavni zadatak energetike. Kod prognoziranja potreba za energijom polazni podatak je porast broja stanovnika na posmatranom uzorku (u pojedinoj zemlji ili za svet kao celinu) kao i specifična potrošnja energije po stanovniku. Prognoze radene do 2060. godine, [6], bazirane na detaljnim analizama našle su da bi specifična potrošnja električne energije za svet kao celinu bila oko 4830 kWh/stanovniku u poređenju sa 2010 kWh/stanovniku iz 1986. godine. Ovaj scenario podrazumeva tehnološki progres u domenu racionalnog korišćenja električne energije, odnosno polazi od pretpostavke da će procesi racionalizacije osetno uznapredovati. Drugi scenario, kojim se samo ekstrapoliraju današnje tehnologije, doveo bi do potrošnje električne energije od 7240 kWh/stanovniku. Na bazi ovakvih prognoza mogu se kreirati projekcije razvoja elektroenergetike. Isto tako je značajno istaći da se očekuje još značajnije relativno učešće električne energije u ukupnim energetske potrebama koje ide, prema već citiranoj referenci, do 52% na kraju tog planskog perioda.

Relativni porast maksimalnog opterećenja (ili ukupne isporučene energije) u tekućoj godini u odnosu na prethodnu, naziva se stopa rasta. Do II svetskog rata stope rasta su u razvijenim zemljama bile umerene, a posle toga se imaju praktično eksponencijalni zakoni rasta potrošnje električne energije u ovim zemljama, sa tipičnim stopama rasta od oko 7%. Kraj sedamdesetih, osamdesete i devedesete godine karakteristične su po ublažavanju stopa rasta, pa čak i po stagnaciji i opadanju potrošnje električne energije u visoko razvijenim zemljama. Slične zakonomernosti se uočavaju i kod proučavanja potrošnje u zemljama u razvoju s tom razlikom što događaji u ovim zemljama kasne za po nekoliko desetina godina u odnosu na dešavanja u razvijenim zemljama. Zakone rasta moguće je modelovati linearnim, logaritamskim, paraboličnim i drugim zakonomernostima. Eksponencijalni zakon rasta ilustrovan je sledećom formulom:

$$W_n = W_0(1 + p)^n \quad (1.1)$$

Oznake u formuli (1.1) imaju sledeće značenje:

W_0 - električna energija potrošena u nultoj godini,

W_n - električna energija koja je potrošena u istom sistemu u n -toj godini,

p - stopa rasta.

Iz formule (1.1) se zaključuje da se udvostručenje potrošnje na desetogodišnjem periodu ostvaruje sa stopom rasta od 7,2%. Naravno, izgradnja svih elektroenergetskih kapaciteta mora pratiti rast konzuma pa sledi da su investicije u sistem sa ovakvim stopama rasta enormno visoke. Potrebno je istaći da su u mnogim zemljama beležene višegodišnje stope rasta potrošnje i od preko 10% tako da odabrani primer ne predstavlja ekstrem. Stope rasta potrošnje električne energije su u neposrednoj vezi sa rastom društvenog proizvoda tako da potrošnja električne energije u velikoj meri odslikava standard.

Globalni pokazatelji koji karakterišu potrošnju su pre svega ukupna isporučena električna energija i maksimalno godišnje opterećenje. Podaci o potrošnji električne energije u zemljama Evropske Unije prikazani su u tabeli 1.2, a odgovarajuće godišnje stope rasta u procentima prikazane su u tabeli 1.3 (podaci u zagradama ne obuhvataju bivšu Istočnu Nemačku). Iz ovih podataka se zaključuje da su razvijene evropske zemlje ušle u zonu umerenih stopa rasta u pogledu potreba za električnom energijom sa vrlo sličnim perspektivama.

Tabela 1.2 Potrošnja električne energije u zemljama Evropske Unije (TWh)

	Podaci iz prošlosti				Prognoze	
	1980.	1990.	1998.	2000.	2010.	2020.
Austrija	36,3	46,9	54,2	56,6	67,3	72,9
Belgija	47,7	62,6	79,3	80,1	87,9	93,8
Danska	23,9	30,8	34,5	35,5	38,6	40,6
Finska	39,9	62,3	76,6	79,4	92,5	102,0
Francuska	248,7	349,5	423,8	444,0	516,0	555,9
Grčka	21,9	32,5	44,2	47,1	65,6	83,4
Holandija	59,7	78,0	99,3	108,0	125,5	149,0
Irska	9,5	13,0	19,6	21,8	32,1	38,5
Italija	179,5	235,1	279,3	296,0	360,0	410,0
Luksemburg	3,6	4,2	5,4	5,7	7,5	8,9
Nemačka	(351,0)	(415,0)	504,3	508,5	520,0	545,0
Portugal	16,2	26,5	37,0	41,1	58,3	80,2
Španija	102,0	145,4	188,7	213,1	286,3	359,4
Švedska	94,0	140,0	143,2	146,2	155,6	156,0
V. Britanija	264,8	309,4	350,3	362,0	425,0	480,0
EU 15	(1498,7)	(1951,2)	2040,5	2343,9	2456,6	2863,2
Norveška	82,2	104,5	118,9	121,7	128,6	137,8
Švajcarska	38,5	50,3	53,4	55,7	64,8	72,6

EUR 17	(1619,4)	(2106,0)	2195,3	2516,2	2634,0	3056,6	3425,6
--------	----------	----------	--------	--------	--------	--------	--------

Ilustrativno je ukazati i na specifične pokazatelje kao što su godišnja potrošnja električne energije po stanovniku i maksimalno opterećenje (sa aspekta ostvarenog maksimuma ili sa aspekta instalisane snage) po stanovniku. U tabeli 1.4 navedeni su podaci o potrošnji električne energije po stanovniku u evropskim zemljama za period od 1980. godine zajedno sa prognozom do 2020. godine.

Tabela 1.3 Godišnje stope rasta potrošnje el. energije u zemljama Evropske Unije (%)

	Podaci iz prošlosti				Prognoze		
	1980-1990.	1990-1998.	1980-1998.	1998-2000.	2000-2010.	2010-2020.	1998-2020.
Austrija	2,6	1,8	2,3	2,2	1,7	0,8	1,4
Belgija	2,8	3,0	2,9	0,5	0,9	0,7	0,8
Danska	2,6	1,4	2,1	1,4	0,8	0,5	0,7
Finska	4,6	2,6	3,7	1,8	1,5	1,0	1,3
Francuska	3,5	2,4	3,0	2,4	1,5	0,7	1,2
Grčka	4,0	3,9	4,0	3,2	3,4	2,4	2,9
Holandija	2,7	3,1	2,9	4,3	1,5	1,7	1,9
Irska	3,2	5,3	4,1	5,5	3,9	1,8	3,7
Italija	2,7	2,2	2,5	2,9	2,0	1,3	1,8
Luksemburg	1,6	3,2	2,3	2,7	2,8	1,7	2,3
Nemačka	(1,7)	0,1	2,1	1,1	0,5	0,7	0,6
Portugal	5,0	4,3	4,7	5,4	3,6	3,2	3,6
Španija	3,6	3,3	3,5	6,3	3,0	2,3	3,0
Švedska	4,1	0,3	2,4	1,0	0,6	0,0	0,4
V. Britanija	1,6	1,6	1,6	1,7	1,6	1,2	1,4
EU 15	(2,7)	1,7	2,5	2,4	1,5	1,2	1,4
Norveška	2,4	1,6	2,1	1,2	0,6	0,7	0,7
Švajcarska	2,7	0,8	1,8	2,1	1,5	1,1	1,4
EUR 17	(2,7)	1,7	2,5	2,3	1,5	1,1	1,4

Tabela 1.4 Potrošnja električne energije po stanovniku u zemljama Evropske Unije (kWh/stanovniku)

	Podaci iz prošlosti			Prognoze		
	1980.	1990.	1998.	2000.	2010.	2020.
Austrija	4809	6068	6710	6995	8359	9004
Belgija	4836	6268	7755	7797	8325	8708
Danska	4665	5998	6516	6660	7012	7164
Finska	8333	12462	14845	15328	17599	19271
Francuska	4629	6177	7222	7473	8360	8800
Grčka	2271	3199	4201	4461	6148	7582
Holandija	4234	5235	6301	6763	7555	8729
Irska	2793	3708	5283	5737	7965	9035
Italija	3181	4145	4856	5148	6360	7257
Luksemburg	9863	10938	12558	13134	15432	16360
Nemačka	(5701)	(6561)	6354	6200	6318	6663
Portugal	1650	2684	3707	4101	5731	7914
Španija	2728	3744	4793	5400	7172	8902
Švedska	11301	16296	16173	16496	17258	16912
V. Britanija	4701	5375	5914	6062	6900	7565
EU 15	(4429)	(5603)	5601	6253	6518	7496
Norveška	20088	24588	26749	27256	27620	28524
Švajcarska	6030	7401	7458	7736	8757	9553
EUR 17	(4642)	(5862)	5848	6511	6779	7757

Za naš EES godišnja proizvodnja u 1994. godini iznosila je oko 30000 GWh, dok je ostvareno maksimalno opterećenje bilo 6100 MW, a godišnja finalna potrošnja (potrošnja iz EES EPS-a) iznosila je 24300 GWh. Razlika između ova dva podatka se odnosi na gubitke energije u prenosu i distribuciji. U 1998. godini proizvedeno je oko 35000 GWh sa maksimalnim opterećenjem od 7180 MW. Na osnovu ovoga se, za ukupnu populaciju od 10 miliona stanovnika, dobija da se prosečno godišnje po stanovniku troši oko 2500 kWh (1997. godine dostignuta je potrošnja od 2750 kWh po stanovniku) i da maksimalno opterećenje po stanovniku iznosi oko 700 W. Radi poređenja, u SAD je ovaj pokazatelj oko 1100 W. Interesantno je da u poređenju sa zemljama Evropske Unije specifična potrošnja električne energije po stanovniku u našoj zemlji ne zaostaje mnogo. Tako je ova potrošnja u Grčkoj 3199, u Italiji 4145, u Francuskoj 6177 kWh i u Norveškoj 24588 kWh po stanovniku, godišnje (podaci za 1990. godinu). Međutim, poređenjem specifične potrošnje ukupne energije po stanovniku dolazi se do manje povoljne slike po našu zemlju, iz

koje se zaključuje da je potrošnja svih energenata u našoj zemlji po stanovniku oko 5 puta niža nego što je to u razvijenim zemljama. Daleko nepovoljnija slika se dobija ako se porede specifične potrošnje energije po jedinici društvenog proizvoda kod nas i u razvijenim zemljama. Ovi pokazatelji ukazuju na meru efikasnosti korišćenja energije i tu je naše zaostajanje izrazito. U razvijenim zemljama se troši oko 200 kWh po 1000 eura društvenog proizvoda, a u Srbiji preko 1600 kWh po 1000 eura društvenog proizvoda, dakle ima se oko 8 puta nepovoljnija slika. U tabeli 1.5 prikazane su specifične potrošnje električne energije, po jedinici društvenog proizvoda u evropskim zemljama.

Tabela 1.5 Specifična potrošnja električne energije po jedinici društvenog proizvoda u zemljama Evropske Unije (kWh/euro)

	Podaci iz prošlosti				Prognoze (%)		
	1980.	1990.	1998.	2000.	2010.	2020.	1998-2020.
Austrija	0,278	0,285	0,283	0,282	0,262	0,240	-14,9
Belgija	0,379	0,415	0,458	0,471	0,413	0,372	-21,0
Danska	0,237	0,250	0,228	0,227	0,202	0,184	-19,2
Finska	0,524	0,602	0,659	0,630	0,557	0,466	-26,1
Francuska	0,335	0,371	0,399	0,341	0,316	0,217	-20,6
Grčka	0,334	0,443	0,508	0,503	0,492	0,443	-11,8
Holandija	0,313	0,350	0,331	0,335	0,308	0,300	-10,4
Irska	0,383	0,367	0,316	0,411	0,417	0,393	-4,5
Italija	0,282	0,298	0,319	0,325	0,334	0,321	-1,1
Luksemburg	0,500	0,472	0,327	0,317	0,333	0,327	3,3
Nemačka	(0,284)	(0,269)	0,255	0,250	0,224	0,209	-16,5
Portugal	0,292	0,357	0,416	0,434	0,431	0,409	-5,8
Španija	0,340	0,363	0,400	0,421	0,410	0,397	-5,7
Švedska	0,635	0,773	0,735	0,711	0,644	0,535	-24,9
V. Britanija	0,435	0,389	0,376	0,369	0,336	0,300	-18,7
EU 15	(0,337)	(0,348)	0,349	0,340	0,320	0,294	-13,5
Norveška	1,068	1,112	0,959	0,958	0,893	0,825	-13,9
Švajcarska	0,266	0,279	0,286	0,220	0,212	0,197	-10,4
EUR 17	(0,346)	(0,358)	0,358	0,347	0,325	0,299	-13,8

Iz table 1.5 se uočava važna zakonomernost povećanja pokazatelja energetske efikasnosti u razvijenim zemljama, što je izvesno i naša perspektiva.

Generalno, u pogledu bogatstva sa energentima naša zemlja deli sudbinu Evrope koja je energetske veoma deficitarno područje.

Glavni trendovi u razvoju savremenih EES su vezani sa činjenicom da su smanjena kapitalna ulaganja u elektroenergetiku i da se teži da se što efektivnije koristi ono što je već izgrađeno. Eksploatacija EES, prema tome, mora da teži ka optimalnim rešenjima sa aspekta kriterijuma ekonomičnosti i sigurnosti. Isto tako zaoštravaju se i zahtevi za povišenim kvalitetom kao i zahtevi za povećanom pouzdanošću i manjim uticajem na okolinu. Ovi zahtevi uslovljavaju široku primenu modernih, sofisticiranih sistema za praćenje, nadzor, regulaciju i kontrolu EES.

Analiza EES se bavi kvantitativnim i kvalitativnim utvrđivanjem stanja svih podsistema u EES. Stanja koja se analiziraju mogu se podeliti na dve velike grupe, na stacionarna i prelazna stanja. Stacionarna stanja mogu biti normalna (okarakterisana tipičnim vrednostima radnih veličina oko nominalnih) ili poremećena (kod kojih neke veličine imaju enormno visoke ili niske vrednosti, kao kratak spoj). Prelazna (tranzijentna) stanja se karakterišu promenom radnih veličina (njihovih maksimalnih vrednosti) sa vremenom.

1.4. Istorijat elektroenergetskih sistema

Elektroenergetika kao oblast starija je od jednog veka i na svom uspešnom putu razvoja imala je nekoliko značajnih tačaka. Prvi električni generator jednosmerne struje izgrađen je 1872. godine (Z. Gramme). Edison je 10 godina kasnije, 1882. godine, realizovao osvetljenje dela New Yorka na jednosmernom naponu od 110 V, i od tada se praktično može smatrati da započinje era elektroenergetskih mreža. Pre toga osvetljenje je rađeno samo sa gasnim lampama i Edisonov izum električne sijalice sa ugljenim vlaknom otvorio je mogućnost primene električne energije za osvetljenje. Nikola Tesla saopštava 1888. godine svoje otkriće višefaznih indukcionih motora koji su bazirani na obrtnom magnetnom polju (koje je Tesla otkrio pet godina ranije). Ovim je učinjen preokret u pravcu primene naizmjenične struje i u industrijske potrebe i istovremeno direktno postavljena i dilema razvoja jednosmerne ili naizmjenične mreže. Teslinim patentima pokrivena je oblast višefaznih generatora, višefaznih transformatora, višefaznog prenosa električne energije i konačno jednofaznog i višefaznog indukcionog motora.

Poseban podsticaj daljem razvoju trofaznih naizmjeničnih sistema desio se 1891. godine kada je realizovan prvi naizmjenični prenos na veliku udaljenost. Tada je, u Nemačkoj, na rastojanje od 179 km na naponu 12 kV prenet snaga od hidroelektrane snage 230 kVA u Laufenu na reci Neckar, pa do Frankfurta na Majni, gde je održavan sajam elektrotehnike.

Krajem 19. veka istovremeno egzistiraju jednosmerni i naizmjenični sistemi (jednofazni i višefazni) sa učestanostima u rasponu od 20 do 100 Hz. Potrebe za unifikacijom postaju sve očiglednije i početak 20. veka obeležen je upravo takvim tendencijama.

Prva hidroelektrana velike snage izgrađena je na slapovima Niagare prema Teslinom projektu. U prvoj fazi, koja je završena 1895. godine, puštena su u pogon tri dvofazna generatora snage 3700 kW na naponu 2400 V. Ova hidroelektrana je postupno proširivana da bi početkom veka imala ukupno 8 generatora ukupne snage 30 MW.

Prednosti primene električne energije u industriji dovode do povećanih potreba za tom vrstom energije. S druge strane veće snage elektrana zahtevaju i više prenosne napone kako bi se sa što manje gubitaka električna energija prenela do potrošača. Tako se u periodu od početka veka pa do II svetskog rata u razvoju elektrifikacije uočavaju dve zakonomernosti: rast snaga agregata u elektranama i povišenje napona prenosnih vodova. Prenosni napon 110 kV uveden je u eksploataciju u SAD i Nemačkoj pre I svetskog rata, a napon 220 kV početkom dvadesetih godina u SAD. Međusobno povezivanje udaljenih elektrana i velikih potrošačkih centara rezultiralo je izgradnjom prvih elektroenergetskih sistema u današnjem smislu reči. Najviši prenosni napon pre II svetskog rata bio je 287,5 kV, na kome je radio dalekovod dug 430 km koji je povezivao hidroelektranu Hoover Dam i Los Angeles. Naponski nivo 400 (380) kV osvojen je 1952. godine kad je u Švedskoj dalekovodom tog napona povezana hidroelektrana Harsprangert u blizini severnog pola i transformatorska stanica u Hallsbergu udaljena skoro 1000 km. Sledeći naponski stepenik od 500 kV pušten je u pogon 1957. godine u SSSR na dalekovodu koji povezuje hidroelektranu na Volgi kod Volgograda i Moskvu (prenosna moć 800 MW), a već 1965. godine u Kanadi je osvojen napon od 735 kV koji povezuje hidroelektrane na reci St. Lawrence sa Montrealom i Quebec-om (Kvebek) za prenos snage od 5700 MW. Naponski nivoi od 1500 i više kV su u razvojnoj fazi s obzirom na tehnička ograničenja koja nameće pojava korone. Pojava korone na nadzemnim vodovima se uočava kad intenzitet električnog polja na površini provodnika postane veći od dielektrične čvrstoće vazduha. Prateći negativni efekti pojave korone su gubici snage, radio i TV smetnje i konačno akustične smetnje. Interesantno je ukazati da su upravo akustične smetnje ograničenje na koje se prvo nailazi pri primeni ultra visokih napona (naponi iznad 800 kV). Istraživanja pokazuju da je dielektrična čvrstoća vazduha (odnosno pojava korone) prirodna granica do koje se može ići sa najvišim naponima na nadzemnim vodovima.

Razvoj modernih vodova jednosmernog napona započeo je 1954. godine kada je kablom dugim 100 km na naponu 100 kV povezano ostrvo Gotland u Baltičkom moru i švedsko kopno (grad Vastervik). Kablovski vodovi zbog veće pogonske kapacitivnosti od nadzemnih vodova, vuku znatno veće reaktivne snage tako da su granične dužine kablova osetno manje u poređenju sa nadzemnim vodovima. Iz tih razloga primena jednosmernog prenosa kod kablovskih vodova je mnogo aktuelnija. Prvi nadzemni jednosmerni prenos visokim naponima realizovan je u SSSR 1963. godine kada je dalekovodom napona ± 400 kV dužine 470 km i prenosne moći 720 MW, povezan Volgograd sa Donbasom. Danas su u eksploataciji i vodovi jednosmernog napona ± 800 kV, kao i vodovi sa naponima preko 1000 kV. Dalekovodi jednosmernog napona koriste se i za povezivanje sistema koji rade na različitim učestanostima.

1.5. Razvoj elektrifikacije u našoj zemlji

Više od jednog veka je prošlo kako u Beogradu funkcioniše električna centrala. Elektrodistribucija je u našem glavnom gradu proslavila, 1993. godine, stogodišnjicu postojanja. Nastava elektrotehnike na Beogradskom univerzitetu obeležila je svoju stogodišnjicu 1994. godine, pošto je daleke 1894. godine profesor fizike sa elektrotehnikom, g. Stevan Marković, otpočeo svoja predavanja na tadašnjoj Velikoj školi pri Katedri za elektrotehniku, kao trećoj takve vrste u Evropi. Ovakvi uspesi u velikoj meri bili su postignuti zahvaljujući našim istaknutim istraživačima Nikoli Tesli i Mihajlu Pupinu koji su iz inostranstva podsticali i usmeravali razvoj ove tada nove oblasti kod nas.

Električna energija je po prvi put upotrebljena u Srbiji, prema većini raspoloživih podataka, 1880. godine, kada je u Beogradu, u kafani "Hamburg", upaljena prva električna sijalica. Prva termoelektrana u Srbiji izgrađena je 1893. godine u Beogradu sa tri mašine na jednosmernom naponu snage 441,3 kW, i naša prestonica među prvim gradovima u Evropi biva osvetljena električnim sijalicama, jer je varijanta sa gasnim osvetljenjem odbačena. Prvo elektrificirano naselje u Vojvodini bila je Stara Pazova (1893. godine), a zatim slede Zrenjanin i Senta (1895.), Subotica (1896.) i Vršac (1897.). Valjevo je elektrificirano 1899. godine sa male hidroelektrane na reci Gradac snage 12 kW, sa generatorima na jednosmernom naponu koji su se ubrzo pokazali tehnički neadekvatnim. Prva industrijska hidroelektrana u Srbiji, u savremenom smislu reči, izgrađena je 1900. godine na reci Đetinji, snage 64 kW, radi snabdevanja Užica električnom energijom. Hidrogeneratori su bili trofazne naizmjenične mašine, mreža i potrošnja su takođe realizovane kao trofazne, naizmjenične, tako da se na ovom primeru može govoriti o počecima elektroenergetike kod nas. Hidroelektrana na Vučjanki (Leskovac) izgrađena je 1903. godine, a 1909. se grade hidroelektrana na Nišavi i hidroelektrana Gamzigrad kod Zaječara. Početkom ovog veka funkcionišu termoelektrane u Beogradu, Šapcu, Čupriji i Jagodini. U Vojvodini se intenzivira elektrifikacija izgradnjom termocentrala u sledećim naseljima: Zemun (1901.), Sombor (1905.), Novi Sad (1910.) itd. Instalirana snaga termocentrale u Beogradu iznosila je skoro 3 MW (sa 6 agregata) na kraju I svetskog rata, a 31,7 MW pred II svetski rat. Priština, Kosovska Mitrovica i Peć elektrificirani su 1927. godine, a Prizren 1928. godine.

Prva termoelektrična centrala u Crnoj Gori izgrađena je 1910. godine na Cetinju, zatim slede centrale u Nikšiću 1912. godine i u Kotoru 1916. godine. Herceg-Novi je elektrificiran 1925. godine, a Podgorica 1927. godine.

2. Modeli elemenata elektroenergetskih sistema

Pod modelom elementa EES ili celog sistema podrazumeva se manje ili više uprošćena predstava tog elementa ili sistema koja je pogodna za simulaciju različitih pojava koje se dešavaju na elementu ili u sistemu. Razlikuju se matematički i fizički modeli. U matematičkim modelima pojave se opisuju matematičkim relacijama ili jednačinama, kojima se nastoji što vernije očuvati sličnost sa pojavama na objektima koji se proučavaju. Fizički model u direktnom smislu predstavlja redukciju stvarnog objekta ili sistema, pri čemu model treba da je takav da očuva identičnu vezu između pojedinih elemenata objekta, odnosno sistema kakva postoji u realnosti, ili, drugim rečima, mora se očuvati visoki stepen sličnosti između modela i realnog objekta, odnosno sistema.

Od fizičkih modela u EES su se uveliko koristili mrežni analizatori pre definitivne prevage kompjuterskih simulacija. Kod analizatora namenjenih za istraživanja stacionarnih stanja vodovi se ekvivalentiraju odgovarajućim impedansama, generatori se predstavljaju kao izvori stalne snage a potrošači kao kombinacija $R-L$ otočnih elemenata. Nešto savršeniji model je mikromreža ili dinamički model. Za razliku od mrežnog analizatora kod mikromreže se generatori modeluju malim mašinama (preko pogonskog motora može se tada menjati odata snaga dodavanjem ili oduzimanjem obrtnih masa, a samim tim se menja i moment inercije). Ovaj model je pogodan za analizu prelaznih procesa, naročito tranzijentne stabilnosti. Prema tome fizički modeli su analogni modeli koji imaju direktnu fizičku sličnost sa objektima.

Univerzalni modeli, koji bi bili primenljivi za sve klase pojava, ne postoje. Prirodna je težnja da se u analizi postave što generalniji modeli, međutim većina modela je problemski orijentisana. Kao ilustracija može se ukazati da se na pojedinim naponskim nivoima koriste različiti modeli nadzemnih vodova, pošto su pojedine pojave i procesi različito izraženi i nisu od podjednakog uticaja. Uopšteno se može konstatovati da postoje manje ili više tačni modeli, primereni određenom problemu.

Modeli omogućavaju dolazak do nekih saznanja koja se ne mogu dobiti samim posmatranjem objekta ili sistema (npr. istraživanja struja kratkih spojeva, pošto se eksperimenti takve vrste teško izvode u praksi).

Prilikom rešavanja raznih složenih problema u EES, na modelima razvijenim za takve potrebe, često se vrši postupak dekompozicije. Razlikuju se funkcionalna, prostorna i vremenska dekompozicija. Funkcionalna dekompozicija odnosi se na razdvajanje funkcija u EES i takvim pristupom se mogu razdvojiti funkcije proizvodnje električne energije od funkcija prenosa, ili se mogu odvojeno posmatrati funkcije operativnog planiranja rada od funkcija planiranja razvoja EES-a. Prostorna dekompozicija podrazumeva bukvalno geografsko razgraničenje delova EES. Vremenska dekompozicija predstavlja razdvajanje procesa prema njihovoj brzini. U zavisnosti od brzine pojave koja bi trebalo da se modeluje postoje različiti modeli, jer bi neki opšti model bio znatno komplikovaniji, a po pravilu to ne bi opravdao osetno višom egzaktnošću rezultata. Generalno se fenomeni u EES mogu podeliti na ultrabrze (među njima su i talasni procesi prilikom atmosferskih pražnjenja kod kojih je vremenska konstanta reda mikrosekunde), na procese srednje brzine u kojima dominiraju elektromagnetne vremenske konstante (prelazne elektromagnetne pojave pri komutacijama i kratkim spojevima i regulacija napona i reaktivnih snaga kod kojih su vremenske konstante reda milisekunde pa sve do sekunde), na sporije procese u kojima dominiraju elektromehaničke vremenske konstante (elektromehanički prelazni procesi i regulacija učestanosti spadaju u ove spore pojave sa vremenskim konstantama od 1 do 60 s) i konačno, na spore toplotne procese u kojima su vremenske konstante reda desetina minuta do nekoliko sati. Glavna ideja vremenske dekompozicije jeste da se svi procesi čije su vremenske konstante manje od opsega posmatranih pojava zanemare, a da se procesi sa većim vremenskim konstantama razmatraju tako kao da su ustaljeni procesi.

Suprotan postupak od dekompozicije je agregacija (npr. objedinjavanje više agregata unutar elektrane u ekvivalentni agregat ili agregiranje delova mreže od manjeg interesa u sistemu u jednu celinu prilikom planiranja izgradnje voda koji se mora ukomponovati u sistem kao celinu i ispitivanje njegovog ponašanja kao elementa sistema prema ostatku sistema). Pri analizi EES postupci dekompozicije i agregacije su veoma česti u upotrebi.

Modeli se u EES-u mogu klasifikovati na različite načine. Tako se modeli mogu podeliti na linearne i nelinearne, zatim na statičke i dinamičke, a takođe i na determinističke i stohastičke. Postoje i druge podele koje su od manjeg interesa za analizu EES.

Linearni modeli su po pravilu bazirani na većim ili manjim uprošćenjima. Pošto su metode za rešavanje nelinearnih modela veoma složene to se onda obično ovi nelinearni modeli linearizuju. Linearizacija se kod većine praktičnih problema analize vrši u okolini neke radne tačke stacionarnog stanja, tj. radne tačke u n -dimenzionom prostoru. Matrice sistema su sa konstantnim parametrima ako se linearizacija vrši na ovakav način. Tako se npr. kod proračuna tokova snaga ima nelinearna zavisnost snaga injektiranja od sinusa odnosno kosinusa karakterističnih uglova i posle linearizacije operiše se sa matricama sa konstantnim parametrima.

Statički modeli opisuju ponašanje sistema skupom algebarskih jednačina i služe kao osnova za proučavanje stacionarnih stanja. U ovom poglavlju biće predstavljeni uglavnom statički modeli elemenata EES-a. Dinamički modeli uvažavaju vremensku promenljivost radnih veličina pa i parametara i njihov reprezent je skup diferencijalnih ili parcijalnih diferencijalnih jednačina.

Kod determinističkih modela vrednosti promenljivih i parametara su jednoznačno određene a kod stohastičkih se određuju samo sa određenom verovatnoćom.

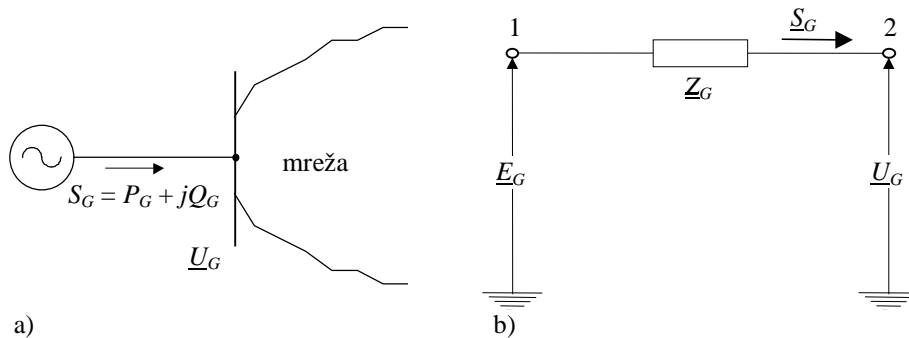
Osnovni elementi EES su generator, transformator, vod (nadzemni ili kablovski) i prijemnici električne energije (koji čine potrošački centar u najširem smislu reči). U ovom kursu modeli ovih elemenata biće izloženi u nešto konciznijoj formi pošto se detaljnija razmatranja mogu naći u udžbenicima iz električnih mašina i u udžbenicima iz elemenata EES.

2.1. Model generatora

Trofazni sinhroni generator, kojim se u savremenim EES-ima dominantno proizvodi električna energija na naizmeničnom naponu, sa fazama a , b i c , se za potrebe proračuna stacionarnih, simetričnih stanja modeluje prema ekvivalentnoj šemi prikazanoj na sl. 2.1. Ovakve šeme se nazivaju monofaznim (jednofaznim ili jednopolnim) šemama, pošto je na njima predstavljena jedna faza trofaznog sistema i to po pravilu faza a koja služi kao referentna faza. Karakteristična radna stanja se proučavaju na ovakvim šemama, a prilike na preostale dve faze (odnosno uvid u radna stanja od interesa na njima) nalaze se kod proračuna stacionarnih, simetričnih stanja, jednostavnim rotacijama fazora.

Dakle, ako je izračunat fazor struje faze a (neka je obeležen sa \underline{I}_a), tada se fazori struja u fazama b i c nalaze kao:

$$\begin{aligned}\underline{I}_b &= \underline{a}^2 \underline{I}_a \\ \underline{I}_c &= \underline{a} \underline{I}_a\end{aligned}\quad (2.1)$$



Sl. 2.1 Sinhroni generator: a) veza sa mrežom b) ekvivalentna monofazna šema sinhronog generatora

U relacijama (2.1) sa \underline{a} je obeležen kompleksni operator (treba ukazati da je skalarna oznaka a rezervisana za oznaku faze)

$$\underline{a} = e^{j2\pi/3} = -1/2 + j\sqrt{3}/2 \quad (2.2)$$

koji je od velike pomoći u analizi trofaznih elektroenergetskih sistema. Analognim postupkom izračunavali bi se i fazori napona u ovim fazama.

U principu trofazni, odnosno višefazni generator naizmenične struje ima više od dva priključka, od kojih je jedan uvek na nultom (referentnom) potencijalu i naziva se neutralni ili nulti priključak. Dakle, simetrija omogućava da se trofazni generatori modeluju kao monofazni sa samo dva priključka (terminala).

Elektromotorna sila (ems) generatora, označena sa \underline{E}_G , i impedansa generatora označena sa \underline{Z}_G , u kojoj dominira sinhrona reaktansa, imaju različite vrednosti u zavisnosti od toga koji se fenomen izučava u sinhronoj mašini. Napon na krajevima generatora \underline{U}_G , i kompleksna snaga \underline{S}_G , često kod proračuna stacionarnih stanja, odnosno kod proračuna tokova snaga i naponskih prilika, sasvim korektno opisuju prilike na spoju generatora i mreže. Naime, sa aspekta mreže uglavnom nije potrebno ići detaljnije u proučavanje pojava u generatoru. Uticaj generatora se tada sagledava preko interakcije u čvoru 2 (sl. 2.1b), koji reprezentuje spoljne (eksterne) krajeve generatora. Reč je obično o generatorskim sabirnicama ili o visokonaponskim sabirnicama elektrane, u slučajevima kada se generatorski transformator tretira kao deo elektrane. U osnovi je tačka (čvor) 2 spoljni terminal generatora. Kod takve predstave pozitivan smer snage je od generatora ka mreži, saglasno konvenciji prema kojoj su snage injektiranja u neku mrežu pozitivne ako ulaze u posmatranu mrežu. Za generator se kaže da je modelovan kao izvor konstantne snage. Međutim, za neke proračune, kao što su to proračuni kratkih spojeva i proračuni stabilnosti, generator se mora modelovati tako da se radna stanja u njemu mogu detaljnije proučavati. Tada se generator modeluje sve do unutrašnjeg kraja (terminala), do tačke 1. Za proračune kratkih spojeva i za proračune stabilnosti generator se zamenjuje svojom odgovarajućom ems i impedansom.

Parametri (impedanse i admitanse) koji figurišu na monofaznoj šemi su uvek veličine date po jednoj fazi (pofazne veličine), dok se sa radnim veličinama (naponi, struje, snage, ems) može postupiti na dva načina. U analizi se češće radi tako da se naponi i struje interpretiraju kao računске (linijske) veličine, što za posledicu ima da će odgovarajuće snage, u monofaznoj šemi, biti trofazne (koje su u analizi upravo od interesa). Ukoliko su naponi i struje u monofaznoj šemi fazne veličine, tada će i odgovarajuće snage biti monofazne. O ovome će biti uvedena precizna konvencija u narednim delovima knjige.

O modelu generatora primerenom proračunu struja kratkih spojeva i proračunu stabilnosti biće još reči u narednim poglavljima.

2.2. Model transformatora

U cilju efikasnog prenosa velikih snaga sa održavanjem gubitaka aktivne snage i energije na tolerantnom nivou, neophodno je u EES-u prenos električne energije realizovati na visokim naponima. Ovako visoke napone nemoguće je ostvariti na naponskom nivou proizvodnje električne energije, pošto raspoloživi izolacioni materijali ograničavaju naponske nivoe u generatoru na granici od 25 kV, već se traženi visoki naponi proizvode u transformatorima. Pored toga, transformatori koji su

statički uređaji i kao takvi osetno jeftiniji od generatora, odvajaju skupe i moćne sinhronne generatore od mreže i od atmosferskih prenapona. Naime, pokazuje se da je povoljnije od ovih prenapona štiti se u transformatorima, nego u generatorima. U EES-u koriste se energetske transformatori sa različitim brojem namotaja. Najčešće su u primeni dvonamotajni i tronamotajni transformatori, kao i autotransformatori.

Prema mestu ugradnje u mreži transformatori se uslovno mogu podeliti na:

- generatorske blok transformatore za podizanje napona;
- prenosne, odnosno interkonektivne transformatore kojima se povezuju visokonaponske mreže različitih naponskih nivoa (to su najčešće autotransformatori, pošto se zbog blizine naponskih nivoa tada smanjuje cena transformatora po jedinici snage; kod praktičnih realizacija često su sa tercijarnim kompenzacionim namotajem);
- distributivne transformatore za spuštanje napona.

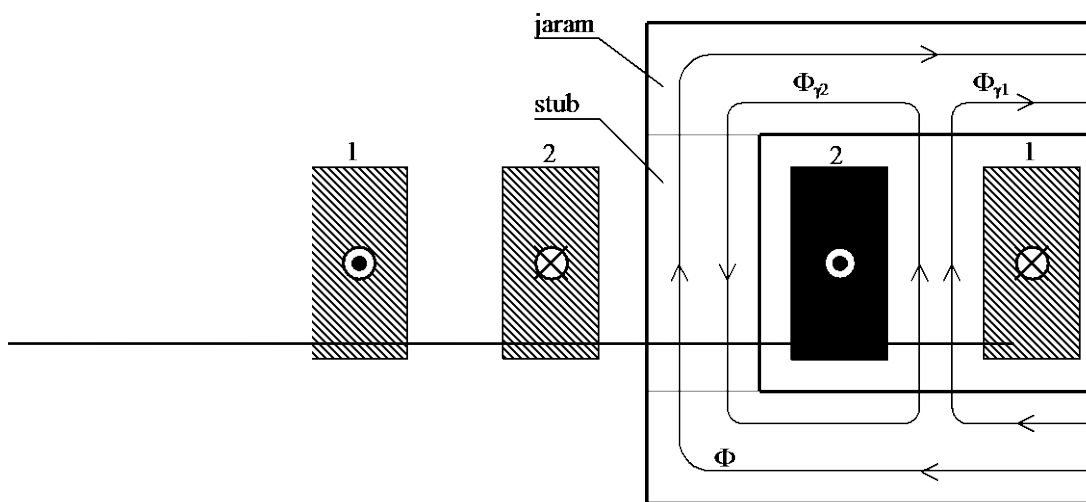
Dok su kod generatorskih blok i distributivnih transformatora pojmovi primar i sekundar, koji su vezani za smer kretanja energije, precizno definisani, dotle je kod interkonektivnih transformatora nešto preciznije koristiti termine višenaponski i niženaponski namotaj, pošto se smer proticanja energije kroz ovakve transformatore menja sa promenama radnih stanja mreže. Kod generatorskih blok transformatora primar je uvek na strani generatora sa nominalnim naponom jednakim nominalnom naponu generatora, dok je sekundar na strani mreže sa nominalnim naponom obično za 5% većim od nominalnog napona mreže kako bi se već projektovanjem mreže okvirno pokrili očekivani padovi napona u mreži. Kod distributivnih transformatora primar je na strani prenosne mreže sa nominalnim naponom jednakim nominalnom naponu mreže, dok je sekundar na strani distributivne mreže (bliže potrošačima) sa nominalnim naponom za 5% većim od nominalnog napona vodova koje napaja, opet iz istih razloga.

Autotransformatori se uveliko koriste da povežu mreže bliskih naponskih nivoa. Suština njihovog rada je da se bez povećanja gubitaka povećava prividna snaga. Dakle, sa istom gustinom fluksa i sa istom gustinom struje (u odnosu na klasične transformatore) postižu se više prividne snage pogodnim vezivanjem namotaja (galvanska veza primara i sekundara), ali po cenu smanjenja reaktanse rasipanja.

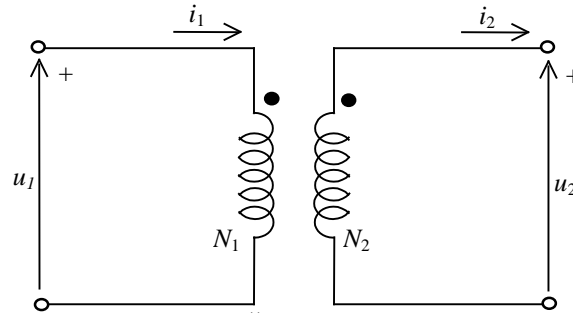
Glavni konstruktivni delovi transformatora su magnetno kolo i namotaji. Magnetno kolo se sastoji od stubova i jarma i njegov zadatak je da kanališe naizmenični magnetni fluks putevima najmanje magnetne otpornosti. Radi smanjenja gubitaka usled vrtložnih struja i histerezisa magnetno kolo se pravi od lameliranih (sa debljinama od 0,3 mm i manjim) visoko kvalitetnih, hladno valjanih, legiranih čelika. Namotaji su od bakra, formirani u cilindrične ili celine sličnog oblika, koje se stavljaju na stubove jezgra. Namotaji nižeg napona postavljaju se bliže jezgru zbog smanjenja izolacionih napreznja. Trofazni transformatori se sastoje od tri namotaja nižeg i tri namotaja višeg napona, pri čemu se svaki od para namotaja po fazama nalazi na svom magnetnom stubu. Naravno, moguća su i rešenja trofaznih transformatora sa tri nezavisne monofazne jedinice. Magnetno jezgro i namotaji se stavljaju u transformatorski sud napunjen uljem koje služi kao izolator, zatim kao medijum za efektivniju predaju toplote okolini i za smanjenje buke u transformatoru.

2.2.1. Model dvonamotajnog transformatora

Pre objašnjenja ekvivalentne šeme realnog dvonamotajnog transformatora interesantno je ukazati da se u teoriji transformatora obično polazi od idealnog transformatora kojim se veoma dobro u bakru transformatora mogu simulirati realni transformatori. Idealni transformator nema gubitke aktivne snage i nema rasutog fluksa s jedne strane, a s druge strane magnetna otpornost mu je nula i nema gubitaka u gvožđu.



Sl. 2.2 Ilustracija putanja rasutih flukseva kod dvonamotajnog transformatora:
1 – namotaj višeg napona, 2 – namotaj nižeg napona



Sl. 2.3 Šema idealnog transformatora

Kod realnih transformatora ovi efekti upravo limitiraju granične radne režime i zato je na sl. 2.2 u cilju ilustracije prikazana skica putanja rasutih flukseva primara i sekundara, $\Phi_{\gamma 1}$ i $\Phi_{\gamma 2}$, koji ne doprinose zajedničkom, odnosno glavnom fluksu, Φ . Nadalje, na sl. 2.3 prikazan je idealni transformator sa idejom da se uvede konvencija o pozitivnim smerovima. Suština ove konvencije je da ako obe struje ulaze u tačku (ili obe izlaze iz tačke) tada one obe doprinose povećanju zajedničkog fluksa Φ . Fluks Φ je fluks po jednom navojku, dok je ukupni fluks (fluksni obuhvat) Ψ , N_1 puta veći, tako da je osnovna naponska relacija oblika:

$$u_1 = \frac{d\Psi}{dt} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

Slično se ima i za sekundarnu stranu:

$$u_2 = \frac{d\Psi}{dt} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

U prethodnim jednačinama sa u_1 i u_2 obeležene su trenutne vrednosti napona. Posle deljenja ove dve jednačine dobija se glavna naponska relacija u transformatoru:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.5a)$$

Naravno, analogna veza postoji i za module napona:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.5b)$$

Na osnovu prethodnog se definiše nominalni odnos transformacije, m_n , kao odnos broja navojaka:

$$m_n = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.6a)$$

ukoliko su oba namotaja istovetno spregnuta, odnosno preko napona:

$$m_n = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} \quad (2.6b)$$

kao odnos modula faznih ili međufaznih (linijskih) nominalnih napona u praznom hodu.

Ovako definisan odnos transformacije uvek je skalar za monofazne transformatore, kao i za trofazne transformatore kod kojih nema faznog pomeraja između korespondentnih fazora na obema stranama (treba ukazati da trofazni transformator npr. sprege Yd5 na isti način vrši fazno pomeranje kako fazora napona tako i fazora struja).

Za realni transformator osnovna jednačina magnetne ravnoteže je:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = R_m \Psi \quad (2.7a)$$

gde je R_m magnetna otpornost transformatora. Znak *minus* na levoj strani relacije (2.7a) je posledica usvojenih pozitivnih smerova na sl. 2.3. Za idealni transformator $R_m = 0$, pa sledi:

$$i_1 / i_2 = N_2 / N_1 \quad (2.7b)$$

Kombinujući (2.6) sa (2.7b) dobija se

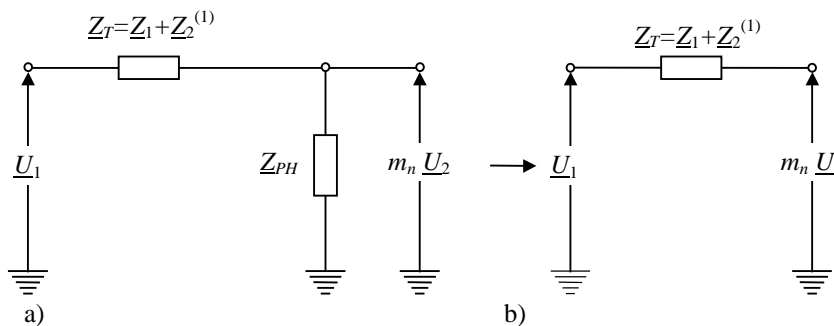
$$\frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} = 1 \quad (2.8a)$$

odnosno,

$$S_1 = S_2 \quad (2.8b)$$

Prethodna relacija samo potvrđuje da se snaga ne menja pri prolasku kroz idealni transformator.

Ekvivalentna monofazna obrnuta Γ -šema dvonamotajnog transformatora prikazana je na sl. 2.4a), dok je njeno pojednostavljenje u smislu zanemarenja otočne grane prikazano na sl. 2.4b).



Sl. 2.4 Ekvivalentna monofazna šema transformatora
 a) obrnuta Γ -šema transformatora b) uprošćena šema transformatora

Na ekvivalentnoj obrnutoj Γ šemi oznake imaju sledeće značenje:

\underline{U}_1 i \underline{U}_2 - fazori napona (kao međufazne ili fazne veličine primara, odnosno sekundara, sa napomenom da se u analizi češće koriste međufazne veličine).

\underline{Z}_1 - impedansa primara;

$\underline{Z}_2^{(1)}$ - impedansa sekundara svedena na primar;

\underline{Z}_{PH} - impedansa otočne grane približno jednaka impedansi praznog hoda transformatora.

Treba istaći da se sa svim parametrima transformatora dosledno operiše kao sa faznim veličinama.

Transformator se može modelovati T-šemom, π -šemom, obrnutom Γ -šemom ili Γ -šemom. Na prethodnoj slici odabrana je obrnuta Γ -šema i njeno pojednostavljenje u smislu zanemarenja parametara otočne grane. Ovo uprošćenje se često radi kod nekih proračuna stacionarnih stanja ali i kod proračuna kratkih spojeva. O tome će više reči biti kad se stigne do objašnjenja za konkretne proračune. Koja će se šema primeniti zavisi i od lokacije transformatora u mreži u smislu postizanja kompatibilnosti sa ostalim elementima sistema (pre svega sa ekvivalentnim šemama vodova).

Na natpisnoj pločici transformatora po pravilu stoje sledeći podaci, prema kojima se računaju parametri ekvivalentne šeme transformatora:

$$S_n, U_{n1}, U_{n2}, \text{ (ili } m_n = U_{n1}/U_{n2}), I_{n1}, I_{n2}, u_k\%, P_{Cu n}^{gub}, P_{Fe}^{gub}, i_0\%.$$

Ovi podaci su raspoloživi iz dokumentacije transformatora i određuju se putem standardnih eksperimenata: praznog hoda i kratkog spoja transformatora. Pored već definisanih veličina, ostale veličine imaju sledeće značenje:

S_n - prividna nominalna trofazna snaga transformatora;

I_{n1}, I_{n2} - nominalne struje primara i sekundara, respektivno, kao računске ili fazne veličine;

$u_k\%$ - procentualna vrednost napona kratkog spoja transformatora;

~~$P_{Cu n}^{gub}$ - nominalni trofazni gubici u bakru transformatora;~~

P_{Fe}^{gub} - gubici u gvožđu transformatora;

$i_0\%$ - procentualna vrednost struje praznog hoda transformatora.

Kod dimenzionisanja transformatora fizička ograničenja su nametnuta gubicima u bakru i gvožđu i kada suma ovih gubitaka prekorači određenu vrednost porast temperature u transformatoru postaje takav da ugrožava izolaciju. Gubici u gvožđu su određeni intenzitetom magnetne indukcije (gustinom fluksa), što je direktno proporcionalno naponskom nivou transformatora, a gubici u bakru su s druge strane određeni gustinom struje, odnosno intenzitetom struje za dati presek bakarnih provodnika u namotajima. Na osnovu prethodnog se zaključuje da moduli napona i struje određuju porast temperature u transformatoru. U praksi se obično njihov proizvod uzima kao mera za dimenzionisanje transformatora i to je prividna snaga transformatora.

Dva osnovna ogleda (eksperimenta) transformatora, ogled kratkog spoja i ogled praznog hoda, omogućavaju nalaženje napona kratkog spoja (odnosno impedanse transformatora u takvim okolnostima) i struje praznog hoda (odnosno admitanse u tim uslovima). Pri ogledu kratkog spoja napon se podiže na primarnoj strani dok je sekundar u kratkom spoju, sve do vrednosti pri kojoj u namotajima teku nominalne struje. Ta vrednost napona pri kojoj teče nominalna struja (u suštini je ovde reč o malim vrednostima napona jer je sekundar u kratkom spoju) iskazana relativno u odnosu na nominalni napon je relativni (ili

procentualni) napon kratkog spoja. Impedansa redne grane transformatora, Z_T , u relativnim jedinicama upravo je jednaka ovoj vrednosti.

Izračunavanje parametara redne grane ekvivalentne šeme vrši se dalje prema sledećim formulama:

$$Z_T = \frac{u_k \% U_{n1}^2}{100 S_n} ; a) \quad Z_T^{(2)} = \frac{u_k \% U_{n2}^2}{100 S_n} ; b) \quad (2.9)$$

Veličina (U_{n1}^2/S_n) predstavlja nominalnu impedansu transformatora u odnosu na koju se referenciraju relativne i procentualne impedanse, tako da se impedansa transformatora Z_T , iskazana u Ω , dobija preračunavanjem sa procentualne vrednosti napona kratkog spoja, odnosno prevođenjem u apsolutne jedinice.

Formula (2.9), dodatno obeležena sa b), dobija se svođenjem impedanse na sekundarnu stranu. Impedanse se, kao što je poznato, na sekundar svode množenjem sa recipročnom vrednošću kvadrata prenosnog odnosa, a naponi množenjem samo sa recipročnom vrednošću. Slično označavanje biće zadržano i u narednim formulama.

Pošto su u ogledu kratkog spoja gubici snage praktično jednaki gubicima snage u bakru (Cu) transformatora (napon je pri ovom ogledu veoma nizak i gubici u gvožđu (Fe) su praktično zanemarivi), to se aktivne otpornosti jednostavno računaju preko formule za proračun gubitaka aktivne snage koji su jednaki proizvodu ove aktivne otpornosti i kvadrata struje (koji se izražava kao količnik snage i napona):

$$R_T = P_{Cun}^{gub} \left(\frac{U_{n1}}{S_n} \right)^2 ; a) \quad R_T^{(2)} = P_{Cun}^{gub} \left(\frac{U_{n2}}{S_n} \right)^2 ; b) \quad (2.10)$$

Pošto su sa P_{Cun}^{gub} označeni zbirni (i u primaru i u sekundaru) nominalni trofazni gubici, to je onda R_T ukupna aktivna otpornost transformatora. Razdvajanje na otpornost primara i na otpornost sekundara moguće je dalje izvršiti bilo merenjem, bilo analitički. Dalje se lako izračunava:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} ; a) \quad X_T^{(2)} = \sqrt{Z_T^{(2)2} - R_T^{(2)2}} ; b) \quad (2.11)$$

Na taj način su određeni parametri redne grane.

Parametri otočne grane se računaju iz ogleda (eksperimentalnih ispitivanja) praznog hoda. Pun nominalni napon U_{n1} se dovodi na stranu višeg napona, a namotaj nižeg napona se pri tom eksperimentu drži otvorenim. Struja koja se pri takvim uslovima uspostavi, I_0 , je veoma mala (reda procenta u odnosu na nominalnu struju kod energetskih transformatora) i ona se naziva strujom praznog hoda. Admitansa otočne grane je, dakle:

$$Y_{PH} = \frac{I_0}{U_{n1}} \quad (2.12)$$

Pošto je procentualna vrednost struje praznog hoda:

$$i_0 \% = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100 \quad (2.13)$$

to se zamenom I_0 u (2.12) dobija:

$$Y_{PH} = \frac{i_0 \% I_n}{100 U_{n1}} \quad (2.14)$$

Proširivanjem sa U_{n1}/U_{n1} dobija se konačna relacija:

$$Y_{PH} = \frac{i_0 \% S_n}{100 U_{n1}^2} \quad (2.15)$$

U narednim relacijama se ponavlja način izračunavanja admitanse otočne grane i istovremeno se u formuli označenoj sa b) vrši preračunavanje na sekundarnu stranu. Sa Y_{PH} obeležena je admitansa praznog hoda, čiji realni deo predstavlja konduktansu G a imaginarni deo (koji je kod transformatora negativan i ukazuje na induktivni karakter reaktanse) predstavlja susceptansu B . Admitansa praznog hoda se izračunava, kao što je već ukazano, preko struje praznog hoda i nominalne admitanse, pošto je u ogledu praznog hoda apsolutno dominirajući efekat otočne grane (negde za tri reda veličine je uticajnija otočna grana u takvim okolnostima). Dakle, ima se:

$$\underline{Y} = G - jB; \text{ a)} \quad \underline{Y}^{(2)} = G^{(2)} - jB^{(2)}; \text{ b)} \quad (2.16)$$

$$Y_{PH} = \frac{i_0 \%}{100} \cdot \frac{S_n}{U_{n1}^2}; \text{ a)} \quad Y_{PH}^{(2)} = \frac{i_0 \%}{100} \cdot \frac{S_n}{U_{n2}^2}; \text{ b)} \quad (2.17)$$

Naravno da važi i:

$$Z_{PH} = \frac{1}{Y_{PH}}; \text{ a)} \quad Z_{PH}^{(2)} = \frac{1}{Y_{PH}^{(2)}}; \text{ b)} \quad (2.18)$$

Konduktansa otočne grane se računa preko izmerenih gubitaka u gvožđu transformatora pri nominalnom naponu (u označavanju se podrazumeva da su ovi gubici baš gubici pri nominalnom naponu, tako da se na to posebno ne ukazuje indeksom):

$$G = \frac{P_{Fe}^{gub}}{U_{n1}^2}; \text{ a)} \quad G^{(2)} = \frac{P_{Fe}^{gub}}{U_{n2}^2}; \text{ b)} \quad (2.19)$$

U narednoj formuli, formula (2.20), susceptansa otočne grane se računa indirektno preko poznate admitanse i konduktanse:

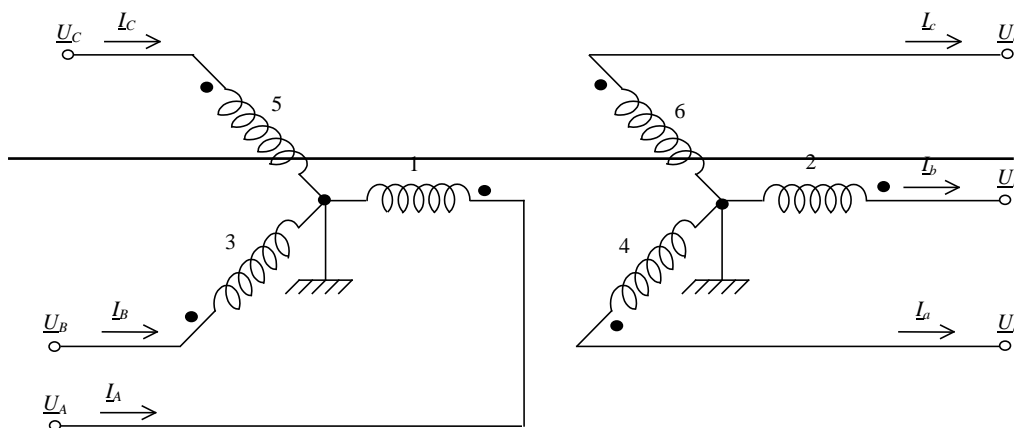
$$B = \sqrt{Y_{PH}^2 - G^2}; \text{ a)} \quad B^{(2)} = \sqrt{Y_{PH}^{(2)2} - G^{(2)2}}; \text{ b)} \quad (2.20)$$

Veličine svedene na primar računaju se saglasno formulama obeleženim sa a), dok su veličine svedene na sekundar označene sa b), kao što je već ukazano.

Nekoliko praktičnih napomena je značajno kod izračunavanja ovih parametara. Sve vrednosti parametara računaju se kao fazne veličine. S druge strane, sve snage u prethodnim relacijama su trofazne a naponi međufazni, tako da se kao rezultat dobijaju veličine po fazi. Naponi koji figurišu u ovim relacijama su nominalni naponi namotaja transformatora, a ne nominalni naponi elemenata koje povezuje taj transformator. Npr. ako je nominalni prenosni odnos nekog transformatora $m_n = 110/36,75$ kV/kV (kao što je ukazano on je obično za 5% veći od nominalnog napona mreže na koju je vezan da bi se kompenzovali očekivani padovi napona na vodu iza transformatora), tada se sa ovim, a ne sa nominalnim naponom mreže, računaju parametri transformatora. Sve veličine računate su u prethodnim formulama kao skalari (moduli kompleksnih veličina) i prelazak na kompleksne vrednosti impedansi i admitansi je krajnje jednostavan kada se poznaju vrednosti realnog i imaginarnog dela.

Za inženjerske proračune važno je razviti osećaj da su kod energetskih transformatora uglavnom parametri redne grane od uticaja u ekvivalentnoj šemi (otočna grana "vuče" veoma male struje u normalnim radnim režimima). Nadalje, bitno je znati da u rednoj grani dominira reaktansa rasipanja nad aktivnom otpornošću i to izraženije kod transformatora većih snaga. Kod tipičnih interkonektivnih transformatora, snage nekoliko stotina MVA, reaktansa rasipanja je oko deset puta (dakle, za red veličine) veća od aktivne otpornosti i prema tome u većini proračuna kao zadovoljavajući reprezent transformatora može se smatrati samo reaktansa rasipanja (tipično u proračunima struja kratkih spojeva).

Ekvivalentna šema transformatora je korisna i za diskusiju o okolnostima pri kojima se neki od parametara zanemaruju u odnosu na uticajnije parametre. Aktivna otpornost redne grane je po pravilu zanemarljiva u odnosu na reaktansu rasipanja, ali ako se žele računati gubici aktivne snage onda se aktivna otpornost redne grane i aktivna provodnost otočne grane moraju uvažiti. Dalje, ako se prate pojave vezane za magnećenje tada se susceptansa otočne grane ne zanemaruje i konačno, ako se ne istražuju ovi posebni fenomeni tada se uprošćava ekvivalentna šema vodeći računa o greškama koje ta uprošćenja mogu da proizvedu.



Sl. 2.5 Sprega dvonamotajnog transformatora zvezda – zvezda

Dvonamotajne trofazne transformatore (ovakav transformator ima ukupno 6 namotaja) moguće je sprezati na različite načine. Najčešće sprega koje se koriste u EES su sprega u zvezdu (Y) i sprega u trougao (Δ). Kod ovih sprega pokazuje se da je grafički korisnija ona predstava koja istovremeno daje i prostornu (ugaonu) poziciju namotaja koja je identična poziciji odgovarajućeg fazora napona pridruženog tom namotaju. Upravo iz ovih razloga je na sl. 2.5 prikazana sprega Yy (sa oba

zvezdišta uzemljena) u kojoj geometrija namotaja i odgovarajući fazori stoje u saglasnosti. Za ovu spregu je karakteristično da se ponaša idealno pod simetričnim uslovima, ali već i male nesimetrije mogu prouzrokovati znatne praktične teškoće. Iz tih razloga se obično do izvora nesimetrije postavlja sprega u trougao, pošto se ona ponaša zaprečno za neke tipove nesimetrija. Detaljnije će o ovome biti reči u delu u kome se proučavaju nesimetrični fenomeni u sistemu.

Tabela 2.1 Tipične vrednosti napona kratkog spoja energetskih transformatora

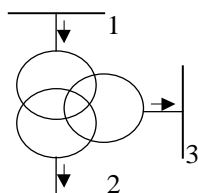
S (kVA)	100	160	250	400	630	1000	2500	4000
u_k %	4	4	6	6	6	6	6	6
S (MVA)	8	20	31,5	63	300			
u_k %	7	10	11	12	12			

Prirodne vrednosti reaktansi rasipanja za razne snage transformatora navedene su u tabeli 2.1. Ako se teži povećanim vrednostima reaktansi rasipanja (npr. 20% zbog ograničenja struja kratkog spoja) tada se to konstruktivno rešava preko podešavanja geometrije namotaja (potrebno je fizički razmaći namotaje u cilju postizanja većeg rasipanja).

2.2.2. Model tronamotajnog transformatora

Tronamotajni transformatori, kako pokazuje iskustvo iz prakse, često se koriste u EES. Posebno treba ukazati da se interkonektivni transformatori izrađuju u mnogim rešenjima kao tronamotajni. Treći namotaj služi ili za lokalne distributivne potrebe, ili za priključenje uređaja za kompenzaciju reaktivne snage (sinhronih kompenzatora, baterija kondenzatora ili reaktora) ili za formiranje puta za nulte komponente struje preko zatvaranja trećeg namotaja u trougao koji nije opterećen. Pored toga tronamotajni transformatori se često koriste i u industrijskim mrežama.

Obično su nominalne snage primara S_{n1} i sekundara S_{n2} , iste (ili približno iste), dok je snaga tercijara tipično između 1/4 i 1/3 od snage primara (npr. $S_n = 150/150/50$ MVA).

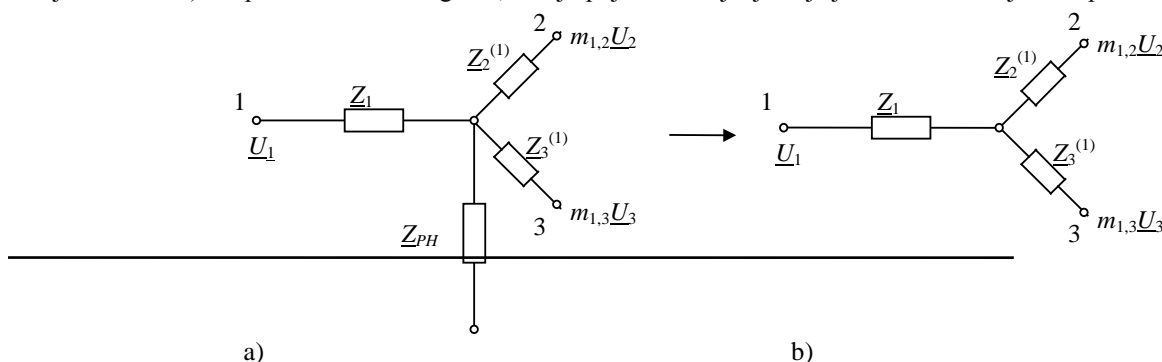


Sl. 2.6 Prikaz tronamotajnog transformatora u monofaznim šemama

Kod tronamotajnih transformatora uvodi se i pojam prolazne snage između dva namotaja pod kojim se misli na manju od snaga, ako su one različite. Pored toga ovde se definišu i tri prenosna odnosa i to:

- m_{VS} ili $m_{1,2}$ kao prenosni odnos višenaponski – srednjenaponski namotaj;
- m_{VN} ili $m_{1,3}$ kao prenosni odnos višenaponski – niženaponski namotaj;
- m_{SN} ili $m_{2,3}$ kao prenosni odnos srednjenaponski – niženaponski namotaj, odnosno kao m_{VN}/m_{VS} .

Na sl. 2.7a) prikazana je ekvivalentna šema tronamotajnog transformatora kao odgovarajuća zvezda sa otočnom granom, dok je na sl. 2.7b) dat prikaz bez otočne grane, u cilju pojednostavljenja koje je u većini inženjerskih proračuna dozvoljeno.



Sl. 2.7 Ekvivalentne šeme tronamotajnog transformatora
a) sa otočnom granom b) bez otočne grane

Na natpisnoj pločici ili u dokumentaciji tronamotajnih transformatora po pravilu stoje sledeći podaci (od kojih se većina određuje takođe iz oglada praznog hoda i kratkog spoja) :

$$u_{k1,2}\%, u_{k1,3}\%, u_{k2,3}\%, P_{Cun1,2}^{gub}, P_{Cun1,3}^{gub}, P_{Cun2,3}^{gub}, S_{n1}, S_{n2}, S_{n3}, P_{Fe}^{gub} \text{ i } i_0 \%$$

Impedansa otočne grane Z_{PH} se računa na isti način kao za dvonamotajni transformator, dok se impedanse primar – sekundar $Z_{1,2}$, primar – tercijar $Z_{1,3}$ i sekundar – tercijar $Z_{2,3}$, sve svedene na primar, izračunavaju kao:

$$\begin{aligned}
Z_{1,2} &= \frac{u_{k_{1,2}} \%}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_{1,2}} \\
Z_{1,3} &= \frac{u_{k_{1,3}} \%}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_{1,3}} \\
Z_{2,3} &= \frac{u_{k_{2,3}} \%}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_{2,3}}
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Pod $S_{1,2}$ podrazumeva se prolazna snaga primar - sekundar, odnosno manja od dveju snaga S_{n1} i S_{n2} . Kod proračuna impedanse $Z_{1,2}$ u Ω , prema prvoj od relacija (2.21), važno je uočiti zakonomernost da ova vrednost ostaje nepromenjena bez obzira pri kojoj snazi se izvodi ogled kratkog spoja (misli se na nepromenjenju vrednost na jednom te istom naponskom nivou). Naime, pri smanjenom $S_{1,2}$ (ogled kratkog spoja urađen sa smanjenim strujama kratkog spoja) ima se proporcionalno smanjenje $u_{k_{1,2}}\%$, tako da $Z_{1,2}$ ostaje konstantno, što je naravno posledica činjenice da je ova impedansa uslovljena samo geometrijom i permeabilitetom sredine u kojoj se namotaji nalaze. Ova tri napona kratkog spoja mogu se dobiti iz tri nezavisna ogleda kratkog spoja. Tako se određivanje $u_{k_{1,2}}\%$ radi pri otvorenom tercijaru i sa sekundarom u kratkom spoju, pri čemu se napon sa primarne strane podiže do vrednosti pri kojoj teče nominalna struja sekundara. Taj napon na primarnoj strani je napon kratkog spoja $u_{k_{1,2}}\%$.

Zbirne aktivne otpornosti primar – sekundar $R_{1,2}$, primar – tercijar $R_{1,3}$ i sekundar – tercijar $R_{2,3}$, sve svedene na primar, izračunavaju se, iz prethodno pomenuta tri ogleda kratkog spoja, preko eksperimentalno određenih gubitaka u bakru kao:

$$\begin{aligned}
R_{1,2} &= P_{Cum1,2}^{gub} \left(\frac{U_{n1}}{S_{1,2}} \right)^2 \\
R_{1,3} &= P_{Cum1,3}^{gub} \left(\frac{U_{n1}}{S_{1,3}} \right)^2 \\
R_{2,3} &= P_{Cum2,3}^{gub} \left(\frac{U_{n1}}{S_{2,3}} \right)^2
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Znajući module impedansi i aktivne otpornosti, reaktanse se sada jednostavno nalaze kao:

$$\begin{aligned}
X_{1,2} &= \sqrt{Z_{1,2}^2 - R_{1,2}^2} \\
X_{1,3} &= \sqrt{Z_{1,3}^2 - R_{1,3}^2} \\
X_{2,3} &= \sqrt{Z_{2,3}^2 - R_{2,3}^2}
\end{aligned} \tag{2.23}$$

U ovim relacijama se podrazumeva da su sve veličine svedene na primar (namotaj visokog napona). Sa sl. 2.7 se vidi da svako od merenja uključuje rednu vezu impedansi tako da se može uspostaviti sledeća veza između impedansi izračunatih na osnovu ogleda kratkog spoja, relacije (2.21) i impedansi ekvivalentne zvezde, pošto je očividno da je :

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{1,2} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2^{(1)} \\
\underline{Z}_{1,3} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3^{(1)} \\
\underline{Z}_{2,3} &= \underline{Z}_2^{(1)} + \underline{Z}_3^{(1)}
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Rešavanjem ove tri jednačine sa tri nepoznate nalaze se impedanse ekvivalentne zvezde tronamotajnog transformatora svedene na naponski nivo primara, pa se dobija:

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_1 &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{1,2} + \underline{Z}_{1,3} - \underline{Z}_{2,3}) \\
\underline{Z}_2^{(1)} &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{1,2} + \underline{Z}_{2,3} - \underline{Z}_{1,3}) \\
\underline{Z}_3^{(1)} &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{1,3} + \underline{Z}_{2,3} - \underline{Z}_{1,2})
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Relacije (2.25) se obično posebno primenjuju za reaktanse a posebno za rezistanse tronamotajnih transformatora. Kako se one redovno koriste u inženjerskoj praksi korisno je ukazati na jednostavno formalno pravilo za izračunavanje impedansi ekvivalentne zvezde. Naime, uočava se da sa znakom minus, u sumu u zagradi na desnoj strani, ulazi impedansa sa indeksima koji ne figurišu sa leve strane jednakosti.

2.2.3. Model regulacionog dvonamotajnog transformatora

Regulacioni transformatori imaju promenljiv broj navojaka na jednom od namotaja čime je omogućeno podešavanje prenosnog odnosa transformatora u određenom opsegu oko nominalnog odnosa transformacije. Regulacija napona vrši se principijelno na dva različita načina pomoću transformatora: regulacija bez opterećenja i regulacija pod opterećenjem. U prvom slučaju ima se osetno jednostavnije tehničko rešenje jer se prebacivanja (promena broja navojaka) vrše u beznaponskom stanju, odnosno transformator se izvodi iz pogona.

Promenljivi odnos transformacije definiše se za regulacione transformatore kao:

$$m = m_n t \quad (2.26)$$

gde su:

m_n - skalarni nominalni odnos transformacije (u relativnom sistemu jedinica jednak 1,0)

t - skalarni prenosni odnos regulacionog transformatora (u relativnom sistemu jedinica tipično između 0,9 i 1,1).

Ovaj se odnos menja diskretno (u koracima), a ne kontinualno, prema relaciji:

$$m = m_n t = m_n (1 + n \Delta t) \quad (2.27)$$

U (2.27) je n - pozitivan ili negativan ceo broj koji određuje položaj regulacionog odvojka. Obično je $n = \pm(10 \div 12)$ za regulacione transformatore pod opterećenjem, dok je $n = \pm(1 \div 2)$ za regulaciju u beznaponskom stanju. Znak *minus* ispred n ukazuje na smanjenje broja navojaka, a znak *plus* na povećanje. Kada je $m = m_n$, tada je naravno $n = 0$.

Sa Δt je označen napon jednog diskretnog stepena u relativnom sistemu jedinica. Kod naših transformatora je obično $\Delta t = 0,015$ ili $0,0125$ (što za $n = 10$ daje regulacioni opseg od 15% ili 12,5%).

Pored skalarnog prenosnog odnosa u analizi EES se uvodi i kompleksni prenosni odnos, \underline{m} , koji uvažava vektorske pomeraje, ξ , između korespondentnih fazora višenaponske i niženaponske strane transformatora:

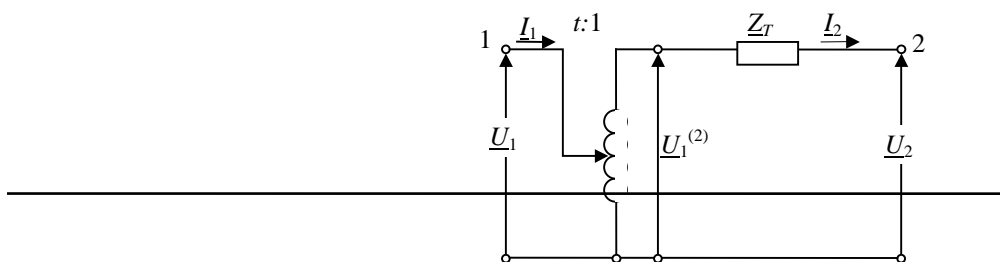
$$\underline{m} = m e^{j\xi} \quad (2.28)$$

Za spregu Yd5 ugao ξ je jednak $+5 \cdot 30^\circ$, a što ukazuje da fazori višenaponske strane (zvezde) prednjače korespondentnim fazorima niženaponske strane (trougla) za 150° . Pod korespondentnim fazorima misli se na fazore pridružene istim fazama predstavljene ili, što je u analizi češće, kao računске ili, što je ređe, kao fazne veličine. Pri tome su ovi fazori ili fazori napona ili fazori struja. Model transformatora sa pomeranjem faza biće izložen u delu analize koji se bavi proračunima tokova snaga.

Regulacioni namotaj se po pravilu izvodi kao višenaponski za napone do 220 kV, jer se na strani višeg napona imaju manje struje (samo se za vrlo visoke i ultra visoke napone, zbog ograničenja koja nameće izolacija prelazi na niženaponsku stranu sa regulatorom). Kada se vrši regulacija pod opterećenjem potreban je regulacioni prekidač, poseban uređaj koji poskupljuje standardnu konstrukciju transformatora za desetak procenata. On vrši prebacivanja postupno, tako da se ne prekine struja, jer bi nagle promene struja izazivale prenapone. Regulacioni prekidač treba pažljivo projektovati u cilju izbegavanja reagovanja na veoma mala odstupanja napona (mrtva zona regulatora).

Ovi transformatori se mogu koristiti za regulaciju napona ili za kontrolu protoka reaktivne snage kod povezivanja dve jake mreže koje ne dozvoljavaju promenu napona.

Regulacionim transformatorima se dakle vrši stepenasta regulacija, pri čemu su diskontinuiteti određeni brojem odvojaka. Pri tome ja važno ukazati da se regulacioni transformator kao element u EES-u ponaša kao promenljiva impedansa.



Sl. 2.8 Ekvivalentna monofazna šema regulacionog dvonamotajnog transformatora

Na sl. 2.8 prikazana je ekvivalentna monofazna šema regulacionog dvonamotajnog transformatora. U šemi je zanemarena otočna grana zbog jednostavnijeg proračuna, tako da se ima:

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T \quad (2.29)$$

Impedansa redne grane se računa preko napona kratkog spoja:

$$Z_T = \frac{u_k \% U_{n1}^2}{100 S_n} \quad (2.30)$$

Pod pretpostavkom da je višenaponska regulaciona strana označena sa indeksom 1 i da je skalarni prenosni odnos regulacionog transformatora t (t je npr. 231/110 ili 1,05 u relativnom sistemu jedinica), sa sl. 2.8 se ima:

$$\underline{U}_1^{(2)} = \frac{\underline{U}_1}{t} \quad (2.31)$$

$$\underline{I}_2 = t \underline{I}_1 \quad (2.32)$$

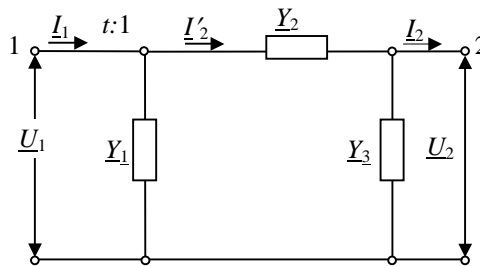
$$\underline{I}_2 = (\underline{U}_1^{(2)} - \underline{U}_2) \underline{Y}_T \quad (2.33)$$

Ako se ova šema interpretira preko Y parametara četvorokrajnika (kojima se definiše veza struja i napona) to se eliminisanjem iz prethodnih jednačina $\underline{U}_1^{(2)}$ i svođenjem jednačina na oblik:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= f(\underline{U}_1, \underline{U}_2) \\ \underline{I}_2 &= f(\underline{U}_1, \underline{U}_2) \end{aligned} \quad (2.34)$$

dobija:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{\underline{Y}_T}{t^2} \underline{U}_1 - \frac{\underline{Y}_T}{t} \underline{U}_2 \quad \text{a)} \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{Y}_T}{t} \underline{U}_1 - \underline{Y}_T \underline{U}_2 \quad \text{b)} \end{aligned} \quad (2.35)$$



Sl. 2.9 Ekvivalentna monofazna π -šema dvonamotajnog regulacionog transformatora

Pri tome je važno ukazati da je regulacioni transformator moguće ekvivalentirati pasivnim četvorokrajnikom samo u slučajevima kad je t skalar. Ako je prenosni odnos kompleksna veličina lako se pokazuje da formalni uslov za pasivne višekrajnike nije zadovoljen.

S druge strane, prema sl. 2.9, direktno se ispisuju jednačine koje povezuju struje i napone:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}'_2 + \underline{Y}_1 \underline{U}_1 \quad \text{a)} \\ \underline{I}'_2 &= \underline{Y}_2 (\underline{U}_1 - \underline{U}_2) \quad \text{b)} \\ \underline{I}'_2 &= \underline{I}_2 + \underline{Y}_3 \underline{U}_2 \quad \text{c)} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Jednačine (2.36) se lako svode na formu jednačina (2.34):

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2) \underline{U}_1 - \underline{Y}_2 \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 &= \underline{Y}_2 \underline{U}_1 - (\underline{Y}_2 + \underline{Y}_3) \underline{U}_2 \end{aligned} \quad (2.37)$$

Poređenjem (2.35) i (2.37) dobijaju se sledeće veze:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 &= \frac{\underline{Y}_T}{t^2} \quad \text{a)} \\ \underline{Y}_2 &= \frac{\underline{Y}_T}{t} \quad \text{b)} \\ \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 &= \underline{Y}_T \quad \text{c)} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Rešavanjem (2.38) se konačno nalazi:

$$\begin{aligned}
 \underline{Y}_1 &= \underline{Y}_T \frac{1-t}{t^2} \quad \text{a)} \\
 \underline{Y}_2 &= \frac{\underline{Y}_T}{t} \quad \text{b)} \\
 \underline{Y}_3 &= \underline{Y}_T \frac{t-1}{t} \quad \text{c)}
 \end{aligned}
 \tag{2.39}$$

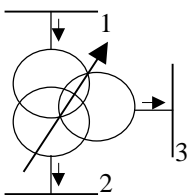
Analiza pokazuje da su \underline{Y}_1 i \underline{Y}_3 uvek suprotni po svojoj prirodi. Ako je jedno induktivnog, drugo je kapacitivnog karaktera i obrnuto. Vidi se da se za $t = 0$ dobija obična šema bez otočnih grana. U zavisnosti od t (da li je t manje ili veće od 1) mogu se dobiti i negativne admitanse koje se fizički ne mogu realizovati. Kad se t približava jedinici, tada \underline{Y}_2 postaje blisko \underline{Y}_T , dok \underline{Y}_1 i \underline{Y}_3 postaju bliske nuli (ima se smanjeni uticaj otočne grane).

Recipročne vrednosti ovih računskih admitansi π -šeme su računске impedanse regulacionog dvonamotajnog transformatora:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_1 &= \frac{t^2}{t-1} \underline{Z}_T \quad \text{a)} \\
 \underline{Z}_2 &= t \underline{Z}_T \quad \text{b)} \\
 \underline{Z}_3 &= \frac{t}{t-1} \underline{Z}_T \quad \text{c)}
 \end{aligned}
 \tag{2.40}$$

2.2.4. Model regulacionog tronamotajnog transformatora

Regulacioni tronamotajni transformator je prikazan na sl. 2.10, a odgovarajuća ekvivalentna šema na sl. 2.11.

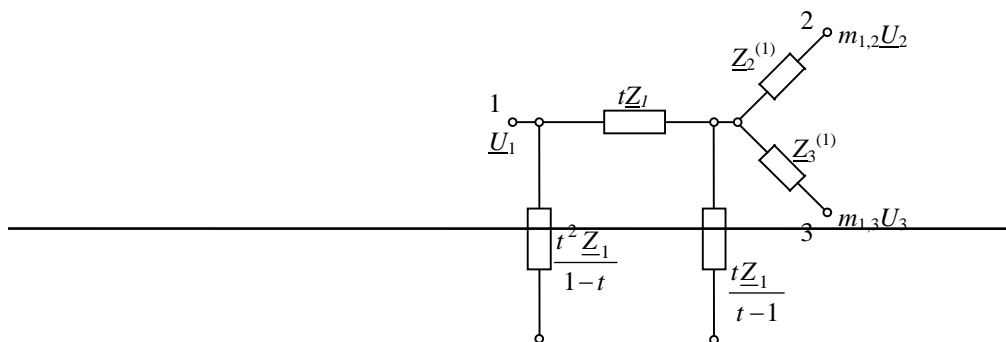


Sl. 2.10 Prikaz regulacionog tronamotajnog transformatora u monofaznim šemama

Regulacioni namotaj je po pravilu na visokonaponskoj strani, pošto su na toj strani radne struje manjeg intenziteta.

Impedansa $\underline{Z}_2^{(1)}$ (impedansa sekundara svedena na primar) je obično vrlo mala pa čak može da bude i negativna (to onda znači da se radi o matematičkom ekvivalentu a ne o realnim fizičkim parametrima).

Ako je broj navojaka na strani sekundara i tercijara fiksna, tada impedanse $\underline{Z}_2^{(1)}$ i $\underline{Z}_3^{(1)}$ ostaju iste kao i za običan tronamotajni transformator. Treba ukazati da je proračun parametara tronamotajnog regulacionog transformatora analogan slučaju proračuna dvonamotajnog regulacionog transformatora.



Sl. 2.11 Ekvivalentna šema regulacionog tronamotajnog transformatora

2.3. Model voda

Vod se u proračunima stacionarnih i kvazistacionarnih stanja u EES može modelovati korišćenjem ili raspodeljenih ili koncentrisanih parametara. Kod modelovanja vodova sa koncentrisanim parametrima (što je po pravilu slučaj u inženjerskim proračunima čak i umereno dugih vodova) koriste se ekvivalentne π i T-šeme. Korišćenje T-šeme uvek uvodi po jedan novi čvor za svaki od vodova u složenom sistemu. Upotrebljivost π -šeme praktično nije ograničena dužinama voda i pojavama koje se izučavaju (podrazumeva se sa uvođenjem koeficijenata popravke), dok su šeme sa rednom granom primerene za proračune u kojima se koriste kraći vodovi. Šeme sa samo rednom reaktansom koriste se u proračunima kratkih spojeva u prenosnim mrežama.

Za kratke vodove parametri redne i otočne grane računaju se kao:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_V &= (r_V + jx_V)L_V = R_V + jX_V \\ \underline{Y}_V &= (g_V + jb_V)L_V = G_V + jB_V \approx jB_V\end{aligned}\quad (2.41)$$

U prethodnim relacijama radi se u stvari o konstruktivnim parametrima voda, odnosno o onim parametrima koji se ne menjaju sa promenom radnih režima (ili se menjaju veoma malo) već su određeni geometrijom dalekovoda i sredinom u kojoj se vod nalazi (vazduh). Malim slovima obeležene su podužne veličine, tj. veličine po km dužine voda L_V . Tako je podužna aktivna otpornost obeležena sa r_V , podužna reaktansa sa x_V , (obe u Ω/km), podužna konduktansa sa g_V i podužna susceptansa sa b_V (obe u S/km). Prema tome velikim slovima su obeleženi ukupni pogonski parametri koji se koriste u proračunima trofaznih simetričnih stanja, koja se vrše na monofaznim šemama u kojima je već kroz ove parametre uvaženo postojanje preostalih dveju faza. Treba isto tako ukazati da se otočna konduktansa (kojom se modeluju struje odvoda i pojava korone) u većini slučajeva zanemaruje pošto je njen uticaj uglavnom akademski.

2.3.1. Podužna otpornost (rezistansa) voda

Podužna aktivna električna otpornost pri jednosmernoj struji se izračunava kao:

$$r_V = \frac{\rho}{s} \quad (2.42)$$

gde je sa ρ obeležena specifična električna otpornost, dok je s , u mm^2 , poprečni presek provodnika. Tipične vrednosti za specifičnu otpornost iznose 17,2 za čist bakar i 28,4 $\Omega/(\text{mm}^2 \text{ km})$ za čist aluminijum pri temperaturi od 20°C . Sa ovako zamenjenim vrednostima aktivna podužna otpornost se dobija u Ω/km , odnosno i formula kazuje da se radi o otpornosti po 1 km dalekovoda. Korekcije koje je neophodno uvažiti kod proračuna aktivne otpornosti su u vezi sa spiralnim motanjem žice u Al-Fe užetu (do 2% iznosi ova korekcija), zatim u vezi sa uhibom i skretanjima trase voda (nekoliko procenata). Kod većih preseka potrebno je uračunati i uticaj skin (površinskog) efekta, odnosno efekta potiskivanja naizmenične struje od centra ka površini provodnika. To je pojava koja se manifestuje samo kod naizmenične struje i posledica je neravnomerne raspodele struje po površini poprečnog preseka. Naime, zamišljene strujne niti u sredini provodnika imaju veću induktivnost od onih pri ivici provodnika (pošto srednju strujnu nit obuhvataju sve linije unutrašnjeg magnetnog fluksa, fluksa unutar provodnika). Posledica ovoga je i veća impedansa a to znači i potiskivanje struje ka ivicama provodnika. Za presek od 240 mm^2 ovaj efekat iznosi do 1%, ali za presek od 490 mm^2 ima se povećanje aktivne otpornosti od oko 5% u odnosu na vrednost aktivne otpornosti pri proticanju jednosmerne struje, kada je gustina struje ravnomerna po površini poprečnog preseka. Za egzaktnija kvantitativna uvažavanja skin efekta moraju se koristiti Besselove funkcije. Razvojem u red ovih funkcija može se faktor skin efekta izraziti kao količnik otpornosti pri naizmeničnoj struji (*alternating current* – AC), koja je u brojitelju, i otpornosti pri jednosmernoj struji (*direct current* – DC), koja je u imenitelju, na sledeći način:

$$\frac{r_{AC}}{r_{DC}} = 1 + 7,5 \cdot 10^{-7} \mu_r f^2 d^4 \quad (2.43)$$

Za numeričke vrednosti u (2.43) μ_r je jednako 1 za nemagnetne materijale (magnetna permeabilnost aluminijuma), f je učestanost u Hz dok je d prečnik provodnika u cm. Vidi se da skin efekat postaje intenzivniji pri većim presecima i na višim učestanostima (što je za elektroenergetske vodove od manjeg interesa).

I na kraju potrebno je ukazati i na zavisnost aktivne otpornosti od temperature. Specifična otpornost menja se sa temperaturom približno po linearnom zakonu:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (2.44)$$

U (2.44) sa ρ_0 je obeležena specifična otpornost na referentnoj temperaturi (obično na 20°C), a α predstavlja koeficijent promene otpornosti sa temperaturom i iznosi 0,004 ($1/^\circ\text{C}$). Imajući u vidu brojčane vrednosti priraštaj specifične otpornosti za bakar za specifikirani priraštaj temperature može se iskazati kao:

$$\frac{\Delta\rho_{Cu}}{\Delta t} = 0,068 \text{ } \Omega\text{mm}^2 / (\text{km}^\circ\text{C}) \quad (2.45)$$

Isti pokazatelj za aluminijum iznosi oko 0,12. To znači da se za 10°C promene temperature ima promena specifične otpornosti aluminijuma od 1,2 $\Omega/(\text{mm}^2 \text{ km})$ u apsolutnim jedinicama, odnosno ima se promena od oko 4%.

2.3.2. Podužna induktivnost (reaktansa) voda

Podužna reaktansa voda x_V , računa se kao:

$$x_V = \omega l_V \quad (2.46)$$

gde je sa l_V označena podužna induktivnost, a sa ω kružna učestanost $\omega = 2\pi f$. Za niske učestanosti koje se koriste u EES-u (50 Hz) može se iskoristiti pojam statičke induktivnosti.

Podužna pogonska induktivnost (reaktansa) je parametar po fazi koji se za slučaj simetričnih radnih stanja (kao primer je korisno zamisliti slučaj sa provodnicima trofaznog sistema raspoređenim u temenima jednakostraničnog trougla i opterećenim simetričnim sistemom struja) može prihvatiti kao dovoljno egzaktan reprezent za modelovanje efekta magnetnog polja. Drugim rečima, sa pretpostavljenom simetričnom geometrijom i simetričnim opterećenjem ovaj efekat se može predstaviti preko induktivnosti jedne faze, npr. faze a , koja se tada naziva pogonska induktivnost (reaktansa), i kojom se korektno modeluje ukupni efekat magnetnog polja na trofaznomvodu, uz korektno uvaženu magnetnu spregu između faza. Formalno se ovo može uraditi samo kada je zbir struja nula, odnosno kada važi:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0 \quad (2.47)$$

U takvim okolnostima za proračune trofaznih sistema mogu se koristiti monofazne ekvivalentne šeme. Formula (2.47) važi i za trenutne vrednosti struja u simetričnom trofaznom sistemu, pošto se tada ima:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sqrt{2}I_a \cos(\omega t) \\ i_b(t) &= \sqrt{2}I_a \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c(t) &= \sqrt{2}I_a \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2.48)$$

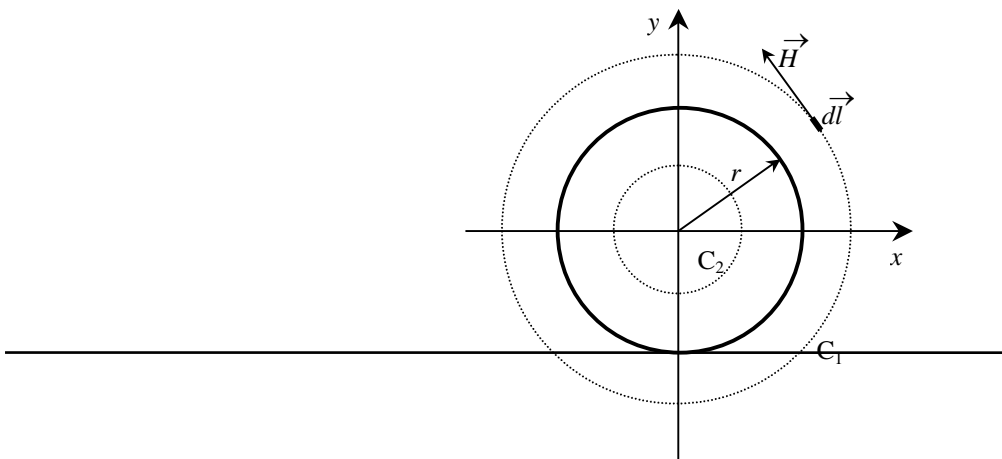
Efektivne vrednosti struja su iste u sve tri faze zbog simetrije i namerno su u relacijama (2.48) obeležene sa I_a (indeks a se mogao izostaviti), a zbir struja u (2.48) je nula što se lako dokazuje korišćenjem elementarnih trigonometrijskih identiteta.

Praktične realizacije nisu ni sa idealnom geometrijom, niti sa idealno simetričnim strujama, ali su odstupanja, osim kod jačih nesimetrija kakve su nesimetrični kratki spojevi, umerena i u granicama inženjerske tačnosti.

Pretpostavljajući linearnu sredinu u kojoj se vod nalazi, induktivnost neke konture definiše se kao konstanta proporcionalnosti između ukupnog fluksnog obuhvata kroz površinu oslonjenu na tu konturu i struje koja je proizvela taj fluksni obuhvat (za nadzemni vod ova pretpostavka je korektna pošto se vod nalazi u vazduhu).

Za provodnike nadzemnih vodova najpre je od interesa proučiti slučaj izračunavanja ukupnog fluksnog obuhvata oko usamljenog provodnika, beskonačne dužine, poluprečnika r , sa strujom I ravnomerno raspoređenom po površini poprečnog preseka. Podrazumeva se da je u cilju korektnog izračunavanja fluksa neophodno zamisliti povratni provodnik, negde u beskonačnosti, kako bi kontura bila strogo određena. Za (ko)sinusoidalnu naizmeničnu struju sa efektivnom vrednošću I i korespondentni fluks povezan sa ovom strujom je (ko)sinusoidalna.

Linije magnetnog fluksa čine koncentrične krugove, na koje je vektor intenziteta magnetnog polja tangencijalan, sl. 2.12, (smer vektora \vec{H} je nacrtan za pretpostavljeni smer struje iz papira). Na sl. 2.12 je vektor \vec{H} obeležen sa strelicom iznad (umesto sa usvojenom fazorskom oznakom) baš kao i vektor \vec{dl} , kako bi se lakše uočila njihova kolinearnost.

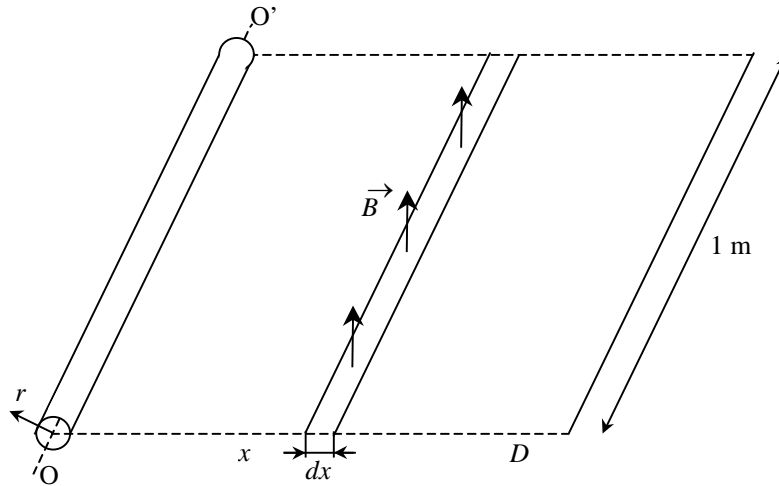


Sl. 2.12 Ilustracija proračuna spoljašnjeg i unutrašnjeg fluksa

Za konturu C_1 , koja se nalazi na rastojanju x od centra provodnika, odnosno od koordinatnog početka, a koja obuhvata ukupnu struju provodnika I , primena zakona cirkulacije vektora \vec{H} daje:

$$\oint_{C_1} \vec{H} \cdot \vec{dl} = H \cdot 2\pi x = I \quad (2.49)$$

Fluksni obuhvat oko provodnika beskonačne dužine može se izračunati prema sl. 2.13, polazeći od izračunavanja fluksa kroz elementarni pravougaonik jedinične dužine ($dx \cdot 1$ m).



Sl. 2.13 Izračunavanje fluksnog obuhvata oko provodnika na elementarnom pravougaoniku

Fluksni obuhvat biće izračunat po jedinici dužine, odnosno po 1 m provodnika, do nekog konačnog rastojanja od provodnika, obeleženog sa D . Naravno, ako D teži beskonačnosti, tada i odgovarajući fluksni obuhvat teži beskonačnosti. Ova teškoća biće prevaziđena kasnije. Ako se spoljašnji fluks (fluks izvan provodnika poluprečnika r) obeleži sa Ψ_s , tada se, polazeći od elementarnog pravougaonika površine $(1 \cdot dx)$, sa magnetnom indukcijom $B = \mu_0 H$ u vazduhu ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) ima:

$$\Psi_s = \int_r^D B(x) dx = \mu_0 \int_r^D \frac{I}{2\pi x} dx = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln \frac{D}{r} \quad (2.50)$$

U (2.50) je integral izračunat počev od površine provodnika poluprečnika r .

Unutrašnji fluks (fluks unutar provodnika poluprečnika r), Ψ_u , računa se prema intenzitetu magnetnog polja na poziciji x unutar provodnika ($x < r$), što daje:

$$H(x) \cdot 2\pi x = I_u(x) = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} I \quad (2.51)$$

Sa $I_u(x)$ je obeležena unutrašnja struja obuhvaćena krugom poluprečnika x . U (2.51) je uvažena ravnomerna raspodela struje po površini poprečnog preseka. Iz (2.51) sledi:

$$H(x) = \frac{x}{2\pi r^2} I \quad (2.52)$$

Izračunavanje integrala unutar provodnika, polazeći ponovo od elementarnog pravougaonika koji se ovaj put nalazi unutar provodnika, i računajući sa magnetnom indukcijom $B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$ ($\mu_r > 1$, ako je reč o provodnicima od čelika) daje ukupni unutrašnji fluks:

$$\Psi_u = \mu \int_0^r \frac{x}{2\pi r^2} I_u(x) dx = \mu \int_0^r \frac{x}{2\pi r^2} \frac{\pi x^2}{\pi r^2} I dx = \frac{\mu I}{8\pi} \quad (2.53)$$

Iz (2.53) se vidi da je ukupni unutrašnji fluks nezavisan od poluprečnika provodnika r . Interesantno je ukazati da se izračunavanje unutrašnje induktivnosti može izvršiti koristeći izraz za energiju koja se nalazi u magnetnom polju unutar provodnika, W_u , polazeći od:

$$W_u = \frac{1}{2} l_u I^2 \quad (2.54)$$

Ukupan fluks, Ψ , se izračunava kao zbir spoljašnjeg i unutrašnjeg fluksa:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_u = 2 \cdot 10^{-7} I \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{D}{r} \right) \quad (2.55)$$

Naravno, u cilju izračunavanja induktivnosti usamljenog provodnika relaciju (2.55) treba samo podeliti sa strujom I . Zamenjujući formalno $\frac{\mu_r}{4}$ sa $\ln e^{\mu_r/4}$ i grupišući argumente prirodnog logaritma dobija se:

$$\Psi = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D}{\frac{-\mu_r}{re^4}} \quad (2.56)$$

a što za $\mu_r = 1$ daje:

$$\Psi = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D}{r_e} \quad (2.57)$$

gde je:

$$r_e = e^{-1/4} r = 0,7788r \quad (2.58)$$

Smisao ekvivalentnog poluprečnika, r_e , svodi se na činjenicu da se prstenastim provodnikom takvog poluprečnika ekvivalentira u magnetnom smislu pun cilindrični provodnik poluprečnika r (naravno, magnetno polje unutar prstena je nula, ali je spoljašnji fluks uvećan za iznos do tačnog kompenzovanja, pošto je $r_e < r$). Dakle, to je ekvivalentni poluprečnik provodnika merodavan za proračun induktivnosti. Za slučaj punog cilindričnog provodnika ovaj poluprečnik se izračunava prema (2.58), gde je sa r obeležen stvarni poluprečnik provodnika. Na ovaj način se uvažava i unutrašnja induktivnost, koja odgovara linijama magnetnog polja raspoređenim u unutrašnjosti provodnika. U stvari uvođenjem ekvivalentnog poluprečnika matematički se cilindrični, puni provodnik sa poluprečnikom r svodi na ekvivalentni prsten sa istom strujom, koji ima poluprečnik r_e i koji je identičan stvarnom u pogledu proračuna induktivnosti. U slučaju Al-Fe užadi, što je standardna praksa na nadzemnim vodovima, ekvivalentni poluprečnik se sa dovoljno tačnosti izračunava kao:

$$r_e \approx 0,95r \quad (2.59)$$

U formuli (2.59) odnos r_e/r može se za svaku konstrukciju užeta tačno izračunati i u praksi je tipično nešto manji, odnosno teži vrednostima bliskim 0,9.

Sada se jednostavno induktivnost jednog provodnika dvožičnog voda (u H/km) dobija deljenjem (2.57) sa I :

$$l_V = 2 \cdot 10^{-4} \ln \left(\frac{D}{r_e} \right) \quad (2.60)$$

Treba ukazati da je induktivnost dvožičnog voda dva puta veća od induktivnosti usamljenog provodnika, odnosno od induktivnosti jednog provodnika dvožičnog voda.

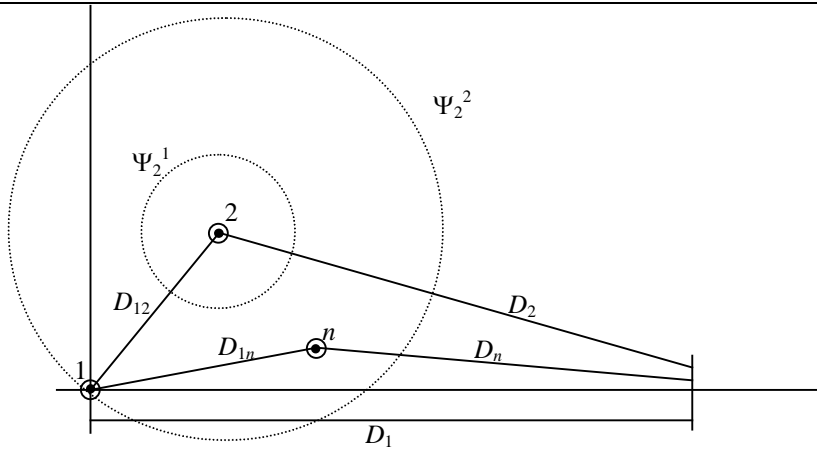
U cilju generalizacije izraza za izračunavanje fluksnog obuhvata oko nekog provodnika u grupi, prelazi se na razmatranje zadatka izračunavanja fluksa u slučaju n paralelnih provodnika, sl. 2.14. Ovakvim zadatkom se ilustruje opšti slučaj nadzemnih vodova u kome neki od provodnika mogu da igraju ulogu i povratnih provodnika. Struje u provodnicima treba da zadovoljavaju sledeći uslov:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \dots + \underline{I}_n = 0 \quad (2.61)$$

odnosno, algebarska suma struja mora biti jednaka nuli. Interesantno je istaći da formula tipa (2.61) važi kako za module fluksa i struje tako i za njihove trenutne vrednosti. Naime, fazori fluksa i struje $\underline{\Psi}$ i \underline{I} su u fazi pa se vidi da je induktivnost nadzemnih vodova ovako tretirana skalarna veličina. Ukupni fluksni obuhvat kroz konturu oslonjenu na provodnik 1 koja završava na rastojanju D_1 , usled struje u tom provodniku, ali i usled struja u svim ostalim provodnicima, se izračunava kao:

$$\Psi_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_1 \ln \frac{D_1}{r_e} + I_2 \ln \frac{D_2}{D_{12}} + \dots + I_n \ln \frac{D_n}{D_{1n}} \right) \quad (2.62)$$

Prvi sabirak u zagradi daje doprinos fluksnom obuhvatu usled struje I_1 , drugi sabirak usled struje I_2 i tako redom. Kod doprinosa drugog sabirka magnetne linije tipa Ψ_2^1 , koje su koncentrični krugovi, ne prolaze kroz konturu od interesa i prva magnetna linija koja doprinosi je obeležena sa Ψ_2^2 (zato je integral izračunat počev od D_{12} pa do D_2). Analogno je, naravno, i za sve ostale provodnike.



Sl. 2.14 Izračunavanje fluksnog obuhvata u slučaju n paralelnih provodnika.

U cilju izračunavanja ukupnog fluksnog obuhvata potrebno je konturu od interesa proširiti do beskonačnosti. Formalno se to realizuje tako da rastojanja D_1 do D_n teže ka beskonačnosti. Naravno, tada bi i ukupan fluks težio beskonačnosti. Međutim, ključna pretpostavka sadržana u (2.61) omogućava da se dobiju konačne vrednosti za ukupan fluksni obuhvat. Treba ukazati da je ova pretpostavka korektna u normalnim radnim stanjima pošto se kod praktičnih rešenja teži i geometrijskoj i električnoj simetriji na dalekovodima.

Relacija (2.62) se sada preuređuje tako da se iskoristi osobina (2.61) (koja naravno važi sem za kompleksne vrednosti struja, obeležavane sa I , i za trenutne vrednosti struja):

$$\Psi_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_1 \ln \frac{1}{r_e} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + \dots + I_n \ln \frac{1}{D_{1n}} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} (I_1 \ln D_1 + I_2 \ln D_2 + \dots + I_n \ln D_n) \quad (2.63)$$

Ako se sada na (2.63) nadoda sledeći izraz, $-\frac{\mu_0}{2\pi} (I_1 \ln D_1 + I_2 \ln D_1 + \dots + I_n \ln D_1)$, s obzirom na (2.61) vidi se da je ovim prethodnom izrazu pridodata nula, i ako se sada ovaj dodatak iskombinuje sa drugim delom izraza (2.63), ima se:

$$\frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_1 \ln \frac{D_1}{D_1} + I_2 \ln \frac{D_2}{D_1} + \dots + I_n \ln \frac{D_n}{D_1} \right) \quad (2.64)$$

Ako se u (2.64) nađe granična vrednost kada rastojanja D_1, \dots, D_n teže beskonačnosti, vidi se da je ona nula, pošto je prvi sabirak egzaktno nula, a ostali postaju nula za velike vrednosti rastojanja.

Dakle, ukupan fluksni obuhvat postaje (po metru dužine):

$$\Psi_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_1 \ln \frac{1}{r_e} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + \dots + I_n \ln \frac{1}{D_{1n}} \right) \quad (2.65)$$

Na ovaj način se prevazišla teškoća koja se pojavila kod izračunavanja ukupnog fluksnog obuhvata oko usamljenog provodnika za slučaj kada se kontura udaljava do beskonačnosti. Naime, taj fluks postaje, kako je već konstatovano, takođe beskonačno velik. Međutim, ako se ista kontura osloni na provodnik dvožičnog (ili višežičnog) voda sa osobinom (2.63) tada fluks kroz nju postaje konačan. Formalno se to manifestuje kroz nalaženje graničnih vrednosti logaritma količnika dvaju velikih rastojanja.

Primena izraza (2.65) na slučaj trofaznog simetričnog voda sa provodnicima u temenima jednakostraničnog trougla, čije su faze a, b i c (sl. 2.15), daje:

$$\Psi_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_a \ln \frac{1}{r_e} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D} \right) \quad (2.66)$$

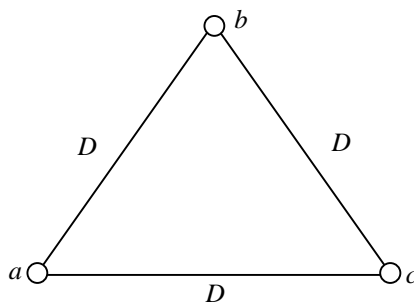
Pošto je prema (2.61): $I_b + I_c = -I_a$, to se dobija: $\Psi_a = \frac{\mu_0}{2\pi} I_a \ln \frac{D}{r_e}$, odnosno odgovarajuća pogonska induktivnost (za fazu a) je:

$$l_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_e} \quad (2.67)$$

U (2.67) je zadržan opšti izraz za magnetnu permeabilnost vazduha (u (2.60) zamenjena je brojčana vrednost). Formula (2.67) je samo još jedan korak do generalne formule za izračunavanje induktivnosti proizvoljno složene geometrije nadzemnih vodova. U osnovi se radi o posebnom slučaju opšte formule koja se obično piše kao:

$$l_v = 2 \cdot 10^{-4} \ln \left(\frac{D_{SG}}{r_e} \right) \quad (2.68)$$

Induktivnost se dobija u H/km za slučaj postavljanja vodova u vazduhu i za brojčanu vrednost koja figuriše ispred logaritma u formuli (2.68), a u H/m za brojčanu vrednost ispred logaritma od (10^{-7}) . Količnik pod prirodnim logaritmom uslovljen je samo geometrijom voda.



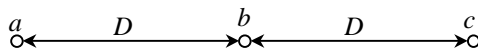
Sl. 2.15 Slučaj simetričnog trofaznog voda

U opštem slučaju proizvoljne geometrije brojilac količnika pod logaritmom formule (2.68) postaje za trofazni vod srednje geometrijsko rastojanje između faznih provodnika, D_{SG} , koje se za proizvoljan raspored faza a , b i c može izračunati kao:

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} \quad (2.69)$$

Ako se formula (2.69) primeni na (za praksu veoma interesantan) slučaj rasporeda faznih provodnika u horizontalnoj ravni, sl. 2.16, tada se ima:

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D \cdot 2D \cdot D} = \sqrt[3]{2} D \quad (2.70)$$

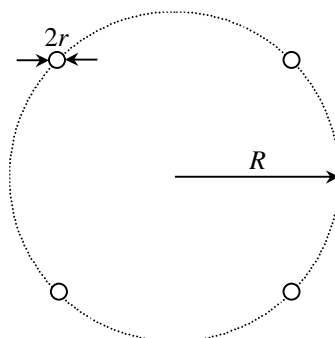


Sl. 2.16 Horizontalni raspored provodnika nadzemnog voda.

Isto tako i imenilac količnika pod logaritmom se uopštava u slučaju konstrukcije u snopu. Naime, na vodovima najviših napona, zbog ograničavanja nepovoljnih efekata korone, klasično rešenje sa jednim provodnikom po fazi se zamenjuje sa rešenjem sa 2, 3, 4 ili više provodnika po fazi. Ovim se u suštini ekvivalentni poluprečnik snopa uvećava (u odnosu na slučaj samo jednog provodnika sa poprečnim presekom koji je jednak zbiru preseka provodnika u snopu), tako da se intenzitet električnog polja smanjuje, pa je i korona manje intenzivna. Za slučaj više provodnika po fazi (konstrukcija sa provodnicima u snopu) ekvivalentni poluprečnik snopa se nalazi kao:

$$r_{es} = \sqrt[n]{nr_e R^{n-1}} \quad (2.71)$$

U prethodnoj formuli n je broj provodnika u snopu, a R je poluprečnik kruga na kome su razmešteni centri provodnika u snopu. Naravno, sa r_e je obeležen ekvivalentni poluprečnik pojedinačnih provodnika u snopu.



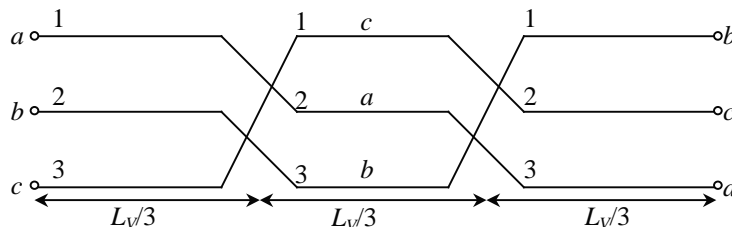
Sl. 2.17 Konstrukcija sa četiri provodnika po fazi (konstrukcija u snopu)

Na taj način formula (2.68) se modifikuje u opštiju varijantu za pogonsku induktivnost:

$$l_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{SG}}{r_{es}} \quad (2.72)$$

Imenilac se može uopštiti i za slučaj višežičnih Al-Fe provodnika (konstrukcija tipa uže).

U praksi se geometrijska simetrija postiže preplitanjem, odnosno transpozicijom faza, sa idejom da se duž cele trase dalekovoda faza *a* pojavljuje geometrijski na po 1/3 trase i na pozicijama faza *b* i *c*, sl. 2.18.



Sl. 2.18 Ilustracija transpozicije faza

Naravno, u praksi ovo podrazumeva posebne (ojačane) stubove za preplitanje faza. Preplitanje se vrši ako je zadovoljena empirijska nejednakost:

$$U_n \text{ (kV)} L_V \text{ (km)} \geq 5000 \text{ (kV}\cdot\text{km)}$$

odnosno, ako je proizvod nominalnog napona voda u kV i dužine voda u km veći od date vrednosti. Pokazuje se da je ova nejednakost zadovoljena po pravilu za vodove naponskih nivoa 220 kV i 400 kV. Naravno, u slučaju transponovanog voda dobijaju se jednake vrednosti podužnih, pogonskih induktivnosti za sve tri faze.

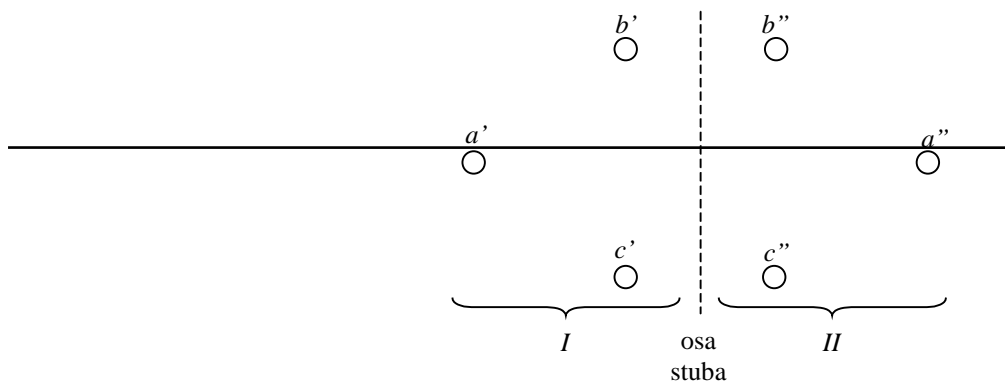
Ukoliko se na istim stubovima vode 2, 3, 4 ili više trofaznih sistema (ili ukoliko su veoma bliski paralelni vodovi) tada se ima dodatna magnetna sprega, pa se i podužne induktivnosti modifikuju. Principijelno se koriste izrazi za fluksni obuhvat oko jednog provodnika u grupi od više provodnika. Za slučaj da se imaju dva trofazna sistema na istim stubovima (sistemi I i II) i pod pretpostavkom da su ova dva sistema sa identičnim provodnicima, simetrična u odnosu na stub, opterećena strujama istog intenziteta, formula za podužnu induktivnost se lako dobija kao (sl. 2.19):

$$l_V = 2 \cdot 10^{-4} \ln \left(\frac{D_{SG}}{r_e} \frac{D_{SG,ij}^{I-II}}{D_{SG,ii}^{I-II}} \right) \quad (2.73)$$

Za relaciju (2.73.) važi:

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{a'b'} D_{a'c'} D_{b'c'}}; \quad D_{SG,ij}^{I-II} = \sqrt[3]{D_{a'b''} D_{a'c''} D_{b'c''}}; \quad D_{SG,ii}^{I-II} = \sqrt[3]{D_{a'a''} D_{b'b''} D_{c'c''}}; \quad (2.74)$$

Kako je $D_{SG,ij}^{I-II} > D_{SG,ii}^{I-II}$ to se zaključuje da je podužna induktivnost dvostrukog voda veća od podužne induktivnosti jednostrukog voda iste geometrije. Konkretno kvantitativne razlike zavise od praktične geometrije i u praksi to nisu osetne razlike.



Sl. 2.19 Dvostruki vod na istom stubu

Tipičan red veličine podužne reaktanse je u granicama od (0,35÷0,43) Ω/km. Ovako uzan dijapazon promena ima se zahvaljujući činjenici da se $\ln(D_{SG}/r_e)$ menja u granicama od (5÷6,8) za slučajeve sa jednim provodnikom po fazi, koji su od praktičnog interesa.

Slično uopštenje, kao u slučaju provodnika u snopu, može se uraditi za slučaj više žica unutar jednog užeta. Naime, uobičajena je praksa da se provodnici nadzemnih vodova ne izvode kao homogene celine već se realizuju u obliku višezičnih užadi sa spiralno namotanim slojevima u kontra smeru. Tako se provodnik Al-Fe 240/40 mm² (Al:Fe = 6:1), koji ima citirane nominalne preseke, sastoji od čeličnog dvoslojnog jezgra (1+6 = 7 žica prečnika 2,68 mm) i od aluminijumskog dvoslojnog omotača (sa 10+16 = 26 žica prečnika 3,45 mm). U slučaju žica identičnih prečnika zakonomernost po kome se računa broj žica u narednom sloju je posledica geometrije i glasi: 1+6+12+18+... Međutim, u odabranom primeru Al žica je većeg prečnika pa je treći sloj realizovan sa 10 žica, ali četvrti sloj mora da ima 6 žica više. Stvarni preseki ovog užeta, vrlo često zastupljenog u našem EES-u su 243,0 mm² Al dela i 39,5 mm² Fe dela, što zbirno daje 282,5 mm². U takvim okolnostima može se tačnije računati ekvivalentni poluprečnik užeta sastavljenog od žica. Radi ilustracije za užu sastavljeno od 7 (1+6) žica ekvivalentni poluprečnik se računa kao n^2 koren od ekvivalentnih poluprečnika svake pojedinačne žice ($0,7788 \cdot r_z$) pomnoženog sa rastojanjima do svih ostalih žica:

$$r_e = r \sqrt[2]{0,7788^7 \cdot 2^{48} \cdot 3^6} = (2,177/3)r = 0,7235r \quad (2.75)$$

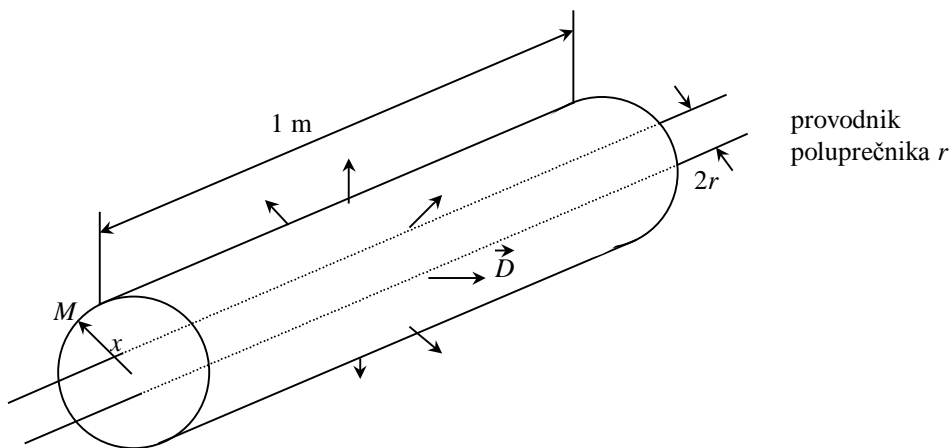
Treba uočiti da je granična vrednost ovog izraza baš 0,7788.

2.3.3. Podužna kapacitivnost (susceptansa) voda

Kapacitivnost faznih provodnika prema zemlji i međusobno prema ostalim provodnicima definiše se kao parametar (definisani geometrijom i sredinom) koji za linearne sredine određuje koeficijent proporcionalnosti između količine naelektrisanja (koja se nalazi na posmatranim elektrodama) i napona (koji vlada između tih elektroda). U osnovi provodnici nadzemnih i kablovskih vodova obrazuju kondenzatore između kojih se javlja promenljiva dielektrična struja. Pošto su provodnici elektrostatički spregnuti, na kapacitivnost jednog faznog provodnika utiču ostali. Provodnici se manje više korektno mogu predstaviti kao sistem paralelnih, dugih provodnika. Određivanje kapacitivnosti se svodi na izračunavanje intenziteta (jačine) električnog polja u okolini provodnika kao prvi korak i, zatim, na izračunavanje napona (razlike potencijala) između tačke u kojoj je izračunat intenzitet električnog polja i površine provodnika. Vektor električnog polja, \vec{K} , se računa u homogenim sredinama preko poznatog vektora električne indukcije, \vec{D} :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{K} \quad (2.76)$$

gde je ϵ dielektrična konstanta koja je za vakuum, odnosno vazduh, $\epsilon = \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m. Zadatak izračunavanja intenziteta električnog polja K postavlja se za slučaj ravnomerno naelektrisanog beskonačno dugog cilindričnog provodnika, sl. 2.20.



Sl. 2.20 Intenzitet električnog

polja u okolini beskonačno dugog cilindričnog provodnika

Primenjujući Gaussov zakon koji kaže da je izlazni fluks vektora \vec{D} , kroz neku proizvoljno zatvorenu površinu S jednak rezultatnom obuhvaćenom naelektrisanju q (u konkretnom slučaju podužnom naelektrisanju pomnoženom sa dužinom cilindra od 1 m), i usvajajući da je Gaussova površina cilindar prečnika x , dužine 1 m, može se napisati sledeća veza:

$$\oint_S D dS \cos \xi = q \cdot 1 \quad (2.77)$$

U (2.77) ξ je ugao između vektora gustine električnog polja \vec{D} , i vektora normale na površinu S . Treba ukazati da su linije električnog polja radialne, odnosno da su vektori električne i magnetne indukcije međusobno ortogonalni (linije magnetnog polja su koncentrični krugovi za pretpostavljenu geometriju). Za usvojenu geometriju vidi se da je $\xi = 0^\circ$. Direktno se nalazi:

$$K \epsilon \cdot 2\pi x \cdot 1 = q \cdot 1 \quad (2.78)$$

odnosno:

$$K = \frac{q}{2\pi\epsilon x} \quad (2.79)$$

Uzimajući da je za suv vazduh $\epsilon_r = 1$ i zamenjujući vrednost za ϵ_0 dobija se:

$$K = 18 \cdot 10^6 \frac{q}{x} \quad (2.80)$$

Za numeričke vrednosti u (2.80) intenzitet električnog polja K se dobija u V/m, ako se podužno naelektrisanje q zameni u C/km i ϵ_0 u F/km. Svođenje naelektrisanja na dužinu od 1 km je prirodnije za dugačke vodove, jer se upravo i podužne kapacitivnosti izražavaju po km dužine voda.

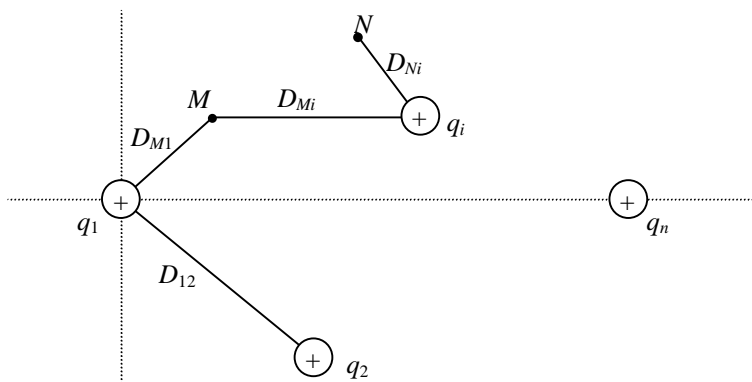
Potencijalna razlika između tačke M (na Gausovoj površini) i površine posmatranog provodnika, sl. 2.20, je:

$$U = \int_r^x K \cdot dx = 18 \cdot 10^6 q \cdot \ln(x/r) \quad (2.81)$$

Pogonska kapacitivnost se iz prethodnog izraza jednostavno dobija deljenjem sa q .

Potencijalna razlika se može izračunati preko nalaženja integrala između dve tačke duž bilo koje putanje koja spaja ove dve tačke. Za proizvoljne dve tačke potencijalna razlika se računa na identičan način, s tim što je brojitelj količnika pod logaritmom rastojanje od provodnika naelektrisanog sa pozitivnim podužnim naelektrisanjem q do udaljenije, a imenitelj, do tačke bliže posmatranom provodniku. Kod izračunavanja integrala kretanje duž putanja paralelnih sa provodnikom ne menja potencijalnu razliku, već je od interesa samo kretanje duž radijalnih pravaca. Ako se pretpostavi da je naelektrisanje q pozitivno, tada je potencijal tačke koja je bliže provodniku veći, pošto intenzitet električnog polja opada sa udaljavanjem od provodnika. Treba uočiti da se udaljavanjem tačke x u beskonačnost (referentni potencijal) pojavljuju teškoće sa izračunavanjem integrala u prethodnom izrazu koje se mogu prevazići pod određenim pretpostavkama u slučaju n paralelnih provodnika, sl. 2.21. Ključna pretpostavka odnosi se na činjenicu da je zbir trenutnih vrednosti podužnih naelektrisanja kod uravnoteženih polifaznih sistema jednak nuli, odnosno da važi:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = 0 \quad (2.82)$$



Sl. 2.21 Slučaj više paralelnih provodnika

Nadalje se pretpostavlja da su poluprečnici provodnika zanemarljivih dimenzija u odnosu na međusobna rastojanja provodnika, tako da se efekat interakcije naelektrisanja među provodnicima zanemaruje. To znači da ravnomernost raspodele naelektrisanja po površini provodnika nije poremećena zbog prisustva ostalih provodnika.

Pošto se radi o linearnoj sredini primenom principa superpozicije potencijalna razlika između tačaka M i N se izračunava sabiranjem doprinosa pojedinačnih naelektrisanja:

$$U_{MN} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln\left(\frac{D_{Ni}}{D_{Mi}}\right) \quad (2.83)$$

Preuređenjem poslednjeg izraza ima se:

$$U_{MN} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln\left(\frac{1}{D_{Mi}}\right) + \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln(D_{Ni}) \quad (2.84)$$

Imajući u vidu pretpostavku (2.82) može se drugoj sumi (na desnoj strani) dodati sledeći izraz:

$$-\frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln(D_{N1}) \quad (2.85)$$

Dodavanjem (2.85) u izraz (2.84) pridodata je nula, tako da se preuređenjem druge sume na desnoj strani u (2.84) dobija sledeće:

$$\frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n q_i \cdot \ln\left(\frac{D_{Ni}}{D_{N1}}\right) \quad (2.86)$$

Sada se tačka N može udaljavati do beskonačnosti (referentna tačka) pošto količnici tipa D_{Ni}/D_{N1} teže ka jedinici, odnosno svaki pojedini logaritamski sabirak teži ka nuli. Prema tome napon proizvoljne tačke M u polju sa n paralelnih provodnika može se pod uvedenim pretpostavkama izračunavati kao:

$$U_M = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n q_i \ln\left(\frac{1}{D_{Mi}}\right) \quad (2.87)$$

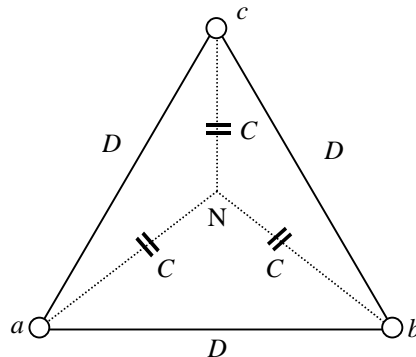
Ako se tačka M pozicionira na površini i -tog provodnika tada rastojanje D_{Mi} postaje jednako poluprečniku provodnika. Primenom na takav slučaj se dobija:

$$U_i = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{1}{D_{i1}} + \dots + q_i \ln \frac{1}{r_i} + \dots + q_n \ln \frac{1}{D_{in}} \right) \quad (2.88)$$

Za rastojanja tipa D_{in} može se bez veće greške usvojiti da su rastojanja centara provodnika jer su poluprečnici, kako je već ukazano, zanemarivih dimenzija u odnosu na međusobna rastojanja provodnika.

Primenom formule (2.88) na slučaj trofaznog simetričnog nadzemnog voda, sl. 2.22, daje :

$$U_a = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_a \ln \frac{1}{r} + q_b \ln \frac{1}{D} + q_c \ln \frac{1}{D} \right) = \frac{q_a}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r} \quad (2.89)$$



Sl. 2.22 Slučaj trofaznog simetričnog voda

U prethodnoj formuli je uvaženo da je $q_a + q_b + q_c = 0$. Treba uočiti da je potencijal tačke N jednak nuli, što se lako dokazuje primenom formule (2.87), tako da se tačka N može koristiti i kao referentna tačka. Naravno, sada je kapacitivnost po svakoj fazi jednaka i iznosi:

$$c = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \quad (2.90a)$$

Ova kapacitivnost je ista kao i kapacitivnost jednog provodnika dvožičnog voda, u šta se lako može uveriti primenom opšte formule. Treba primetiti da je ova kapacitivnost dvostruko veća od kapacitivnosti između provodnika dvožičnog voda (redna veza kapacitivnosti). Ova kapacitivnost je istovremeno jednaka kapacitivnosti između provodnika i tačke N koja se nalazi u težištu posmatranih provodnika. Formula (2.90a) se obično uopštava uvođenjem srednjeg geometrijskog rastojanja, D_{SG} , između faznih provodnika (na isti način kao kod tretiranja pogonske induktivnosti), tako da se dobija:

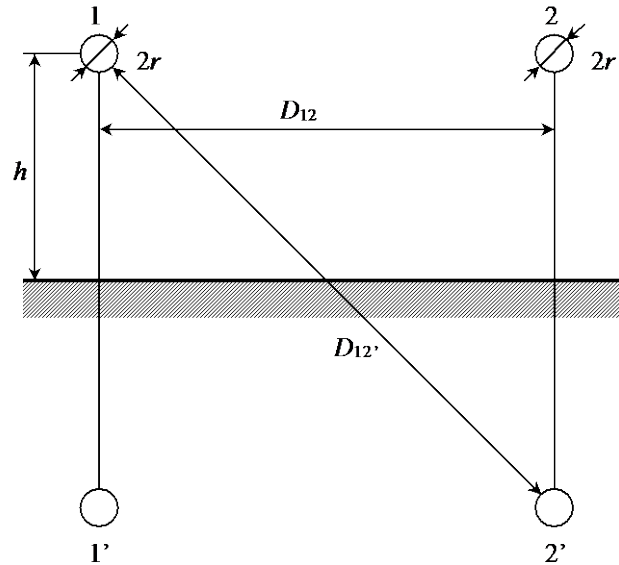
$$c = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D_{SG}/r)} \quad (2.90b)$$

Zamenom vrednosti za ϵ (dielektrična konstanta za vazduh) od $8,854 \cdot 10^{-9}$ F/km dobija se formula koja se veoma često koristi za izračunavanje pogonske kapacitivnosti u F/km:

$$c = \frac{55,55 \cdot 10^{-9}}{\ln(D_{SG}/r)} \quad (2.90c)$$

Ponovo se ukazuje da se ovde radi o pogonskoj kapacitivnosti (koja je istovremeno i direktna i inverzna u ovom slučaju) bez uticaja zemlje.

Ako se uvaži uticaj zemlje (na sl. 2.23 data je ilustracija dvožičnog voda sa uticajem zemlje) tada se problem rešava korišćenjem metode ogledanja, odnosno uticaj zemlje se zamenjuje sa provodnicima simetričnim u odnosu na realne fizičke provodnike nad zemljom, ali sa naelektrisanjem suprotnog polariteta. Efekat zemlje se uvažava u situacijama kada provodnici nisu dovoljno visoko nad zemljom. Ovakvim pristupom potencijal zemlje ostaje nula, a što je uobičajena pretpostavka u proračunima nadzemnih vodova.



Sl. 2.23 Uticaj zemlje na primeru dvožičnog voda

Potencijal provodnika 1 je u okolnostima prema sl. 2.23 dat sa:

$$V_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} + \frac{-q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{12'}}{D_{12}} \quad (2.91)$$

Gornja relacija se svodi na:

$$V_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2h}{r} \frac{D_{12}}{D_{12'}} \right) \quad (2.92)$$

Na sličan način se za potencijal provodnika 2 dobija:

$$V_2 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{12'}}{D_{12}} + \frac{-q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} \quad (2.93)$$

Relacija (2.93) se može urediti na sledeći način:

$$V_2 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{r}{2h} \frac{D_{12'}}{D_{12}} \right) \quad (2.94)$$

Kako je napon $U_{12} = V_1 - V_2$ to se smenom V_1 prema (2.92) i smenom V_2 prema (2.94) dobija:

$$U_{12} = \frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2h}{r} \frac{D_{12}}{D_{12'}} \right) \quad (2.95)$$

Kapacitivnost između ova dva provodnika je:

$$c_{12} = \frac{q}{U_{12}} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_{12}}{r D_{12'}}\right)} \quad (2.96)$$

Kapacitivnost do tačke sa nultim potencijalom (koja je na sredini između dva provodnika) je ponovo dvostruko veća i iznosi:

$$c_1 = \frac{q}{U_1} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_{12}}{r D_{12'}}\right)} \quad (2.97a)$$

Formula (2.97a) se može lako uopštiti na slučaj trofaznog voda sa provodnicima u snopu sa zamenjenom vrednošću za dielektričnu konstantu:

$$c_V = \frac{55,55 \cdot 10^{-9}}{\ln\left(\frac{D_{SG}}{r_{es}^c \sqrt{4h_{SG}^2 + D_{SG}^2}}\right)} \quad (2.97b)$$

U formuli (2.97b) pogonska kapacitivnost se dobija u F/km za numeričku vrednost u brojičniku i, naravno, za sva ostala geometrijska rastojanja smenjena u m (ili u cm, pošto su količnici u pitanju). Pojam h_{SG} u potpunosti je analogan pojmu srednjeg geometrijskog rastojanja i definiše se kao srednja geometrijska visina faznih provodnika nad zemljom. Pojam r_{es}^c razlikuje se od ekvivalentnog poluprečnika snopa kod proračuna induktivnosti u snopu, formula (2.71), zato što u njemu figurišu stvarni (a ne ekvivalentni) poluprečnici provodnika koji čine snop.

Iz (2.97a) se vidi da se uticaj zemlje manifestuje preko logaritma količnika u kome je u brojičniku dvostruka visina vešanja provodnika nad zemljom, a u imeničniku je rastojanje od provodnika 1 do lika provodnika 2. Ovaj količnik je u svim praktičnim situacijama blizak jedinici tako da su greške koje se čine sa zanemarenjem uticaja zemlje svega reda promila.

Treba ukazati da se ekvivalentne visine vešanja provodnika nad zemljom preciznije računaju sa uvažavanjem ugiba provodnika (forma lančаницe).

Generalizacija proračuna parametara nadzemnog voda biće posebno prezentovana kod proračuna nesimetričnih stanja (modelovanje vodova za potrebe proračuna nesimetričnih kratkih spojeva).

2.3.4. Podužna odvodnost (konduktansa) voda

Podužna konduktansa voda je u osnovi određena sa dva fenomena i to sa koronom i sa strujama odvoda usled nesavršenosti izolacije. Korona se javlja na površini provodnika nadzemnih vodova kada intenzitet (jačina) električnog polja nadvlada dielektričnu čvrstoću vazduha. Posledice korone su gubici aktivne snage, radio, odnosno TV smetnje i akustične smetnje (buka). Kod nadzemnih vodova ultravisokih napona (1000 kV i više) najizraženiji ograničavajući faktori koji se suprotstavljaju daljem rastu napona su upravo akustične smetnje.

Kritično polje, koje karakteriše stanje razvijene korone, računa se kao:

$$K_{kr} = K_0 \delta \left(1 + \frac{0,298}{\sqrt{r\delta}}\right) \quad (2.98)$$

U (2.98) sa K_0 je označena inicijalna jačina električnog polja, odnosno dielektrična čvrstoća vazduha, pri kojoj dolazi do pojave korone i ona iznosi 30 kV_{max}/cm (21,2 kV/cm). Poluprečnik provodnika r treba smeniti u cm da bi se za numeričku vrednost u (2.98) dobilo K_{kr} u kV_{max}/cm. Sa δ je označena relativna gustina vazduha:

$$\delta = \frac{0,289 \cdot p}{273 + T} \quad (2.99)$$

Za datu numeričku vrednost u (2.99) atmosferski pritisak p treba smeniti u mbar a temperaturu T u °C. Iz (2.99) se vidi da se za $T = 20^\circ\text{C}$ i za $p = 1013,25$ mbar dobija $\delta = 1$.

Kritični napon korone, $U_{f,kr}$, ovde je tretiran kao fazna veličina jer je kod proučavanja korone prirodno napone iskazivati po fazi, zbog direktne korelacije sa električnim poljem. On karakteriše stanje razvijene korone i nalazi se izjednačavanjem jačine polja na površini (faznog) provodnika sa kritičnim poljem:

$$K_{kr} = \frac{cU_{f,kr}}{2\pi\epsilon r} = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \quad (2.100)$$

U formuli (2.100) c je pogonska kapacitivnost koja se računa prema (2.90). Posle zamene (2.90) u (2.100) dobija se:

$$U_{f,kr}^i = K_{kr} r \ln \left(\frac{D_{SG}}{r} \right) \quad (2.101)$$

U (2.101) sa $U_{f,kr}^i$ je označen kritični (fazni) napon korone pri idealizovanim uslovima, tj. pri idealno lepom vremenu. Stvarni kritični napon korone je niži od idealizovanog i iznosi:

$$U_{f,kr} = m_1 m_2 U_{f,kr}^i = m_1 m_2 K_{kr} r \ln \left(\frac{D_{SG}}{r} \right) \quad (2.102)$$

U (2.102) sa m_1 je označen koeficijent vremenskih uslova koji uvažava sniženje kritičnog napona korone pri nepovoljnim vremenskim uslovima (kiša, sneg, inje, mraz, rosa, magla,...) u odnosu na kritični napon pri idealno lepom vremenu. Ovaj koeficijent se kreće u granicama od 0,3 (za ekstremno loše vremenske prilike) do 1 za lepo vreme. Sa m_2 je označen koeficijent neglatkosti (rapavosti) površine provodnika koji karakteriše smanjenje kritičnog napona korone na realnim provodnicima u odnosu na kritični napon za idealno gladak cilindrični provodnik i tipična vrednost za užad na nadzemnim vodovima je oko 0,9.

Za slučaj provodnika u snopu izraz za kritični napon, s obzirom na neravnomernost električnog polja u okolini snopa provodnika, postaje:

$$U_{f,kr} = K_{kr} m_1 m_2 \frac{n r \ln(D_{SG}/r_{es})}{1 + (n-1)r/R} \quad (2.103)$$

Značenje oznaka u (2.103) je isto kao pri tretiranju snopa za potrebe proračuna induktivnosti, formula (2.71).

Za izračunati kritični napon gubici snage na koronu su funkcija (faznog) radnog napona, $U_{f,r}$, i nalaze se kao:

$$P_k^{gub} = 1,625 \cdot 10^{-5} U_{f,r}^2 \left(\frac{U_{f,r}}{U_{f,kr}} \right)^5 \quad (2.104)$$

Za numeričke vrednosti u (2.104) fazne napone treba smeniti u kV da bi se trofazni gubici dobili u MW/(100 km) voda. Ova formula je primenljiva za opseg napona:

$$0,5 \leq (U_{f,r}/U_{f,kr}) \leq 1 \quad (2.105)$$

Za opseg napona $(U_{f,r}/U_{f,kr}) \geq 1$ primenjuje se sledeća formula:

$$P_k^{gub} = 3 g_V U_{f,r}^2 \quad (2.106)$$

U (2.106) parametar g_V se izračunava kao:

$$g_V = 10^{-4} \left[1 - e^{-3,05(U_{f,r}/U_{f,kr}-1)} \right] \quad (2.107)$$

Za numeričke vrednosti u (2.107) g_V se dobija u S/(100 km) voda.

2.3.5. Ekvivalentne šeme voda

Modeli prenosnih vodova se dele na modele sa raspodeljenim i koncentrisanim parametrima. Pošto je po prirodi stvari vod element sistema kod koga efekat raspodeljenosti dominira, to su svakako modeli sa raspodeljenim parametrima egzaktniji. Dakle, veoma egzaktna analiza prenosnih vodova vrši se pomoću pretpostavke da parametri voda nisu koncentrisani već raspodeljeni (distribuirani) po celoj dužini voda. Naredna analiza je ponovo bazirana na pretpostavci da je reč o simetričnim, stacionarnim stanjima tako da se i modelovanje i odgovarajuće analize vrše na monofaznim šemama.

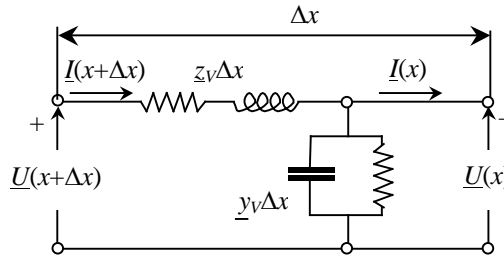
Električna energija se prenosi od elektrana do potrošača prenosnim i distributivnim mrežama u kojima nadzemni (u nadzemne vodove svrstavaju se i samonoseći kablovski snopovi) i kablovski vodovi igraju veoma značajnu ulogu kao elementi sistema. Iako je kablovska tehnika poslednjih decenija bitno napredovala (danas su u pogonu kablovi na naponima do 500 kV) ipak je kablovski prenos, za istu prenetu snagu, čak do deset puta skuplji od nadzemnog. Iz tih razloga primena kablova je ograničena na gradske uslove i na podvodna polaganja kablova i zato je i naredna analiza usmerena uglavnom na nadzemne vodove.

Podužna impedansa i admitansa voda (veličine po jedinici dužine voda) iskazane preko realnog i imaginarnog dela su:

$$\begin{aligned}\underline{z}_V &= r_V + jx_V \\ \underline{y}_V &= g_V + jb_V\end{aligned}\quad (2.108)$$

U ovim relacijama sa r_V je obeležena podužna otpornost voda u Ω/km , sa x_V podužna reaktansa u Ω/km , sa g_V podužna konduktansa u S/km i sa b_V podužna susceptansa u S/km . Način određivanja ovih parametara objašnjen je u prethodnom delu ove knjige. Ukupna impedansa i admitansa se dobijaju množenjem podužnih vrednosti sa dužinom prenosnog voda L_V koja se izražava u km, tako da se ukupni pogonski parametri koji se koriste za proračune trofaznih simetričnih stanja \underline{Z}_V , \underline{Y}_V , R_V , X_V , G_V i B_V dobijaju vrlo jednostavno.

Na šemi prikazanoj na sl. 2.24, nalazi se deo voda elementarne dužine Δx , odnosno jedan diferencijalni segment (sekcija) voda.



Sl. 2.24 Segment voda sa raspodeljenim parametrima

Relacija za izračunavanje pada napona na rednoj, podužnoj impedansi omogućava prelazak na sledeću diferencijalnu jednačinu:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{U(x+\Delta x) - U(x)}{\Delta x} = \frac{dU(x)}{dx} = \underline{z}_V I(x) \quad (2.109)$$

Promena struje na elementarnoj dužini voda Δx je:

$$I(x+\Delta x) = I(x) + (y_V \Delta x) U(x) \Rightarrow \frac{I(x+\Delta x) - I(x)}{\Delta x} = y_V U(x)$$

Preuređenjem gornje relacije se dobija:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{I(x+\Delta x) - I(x)}{\Delta x} = \frac{dI(x)}{dx} = y_V U(x) \quad (2.110)$$

Jednačine (2.109) i (2.110) čine sistem od dve linearne diferencijalne jednačine prvog reda sa konstantnim koeficijentima i sa dve nepoznate veličine. Diferenciranjem i smenom dobija se homogena diferencijalna jednačina drugog reda sa jednom nepoznatom :

$$\frac{d^2 U(x)}{dx^2} = \underline{z}_V \frac{dI(x)}{dx} = \underline{z}_V y_V U(x) \quad (2.111a)$$

ili

$$\frac{d^2 U(x)}{dx^2} - \underline{z}_V y_V U(x) = 0 \quad (2.111b)$$

Opšte rešenje ove diferencijalne jednačine, poznate kao jednačina telegrafičara, je :

$$U(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (2.112)$$

gde su A_1 i A_2 integracione konstante a γ je konstanta prostiranja u $1/\text{m}$, koja je očevidno:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z}_V y_V} = \alpha + j\beta \quad (2.113)$$

U (2.113) oznake imaju sledeće značenje:

α - konstanta slabljenja u neperima po jedinici dužine (mera smanjenja modula napona ili modula struje u smeru protoka snage),

β - fazna konstanta u radjanima po jedinici dužine (mera promene faznog ugla dva fazora napona ili dva fazora struja u dve različite tačke proizvoljno dugačkog voda).

Analogno jednačini (2.112) moguće je formirati jednačinu po struji čijim rešavanjem se dobija:

$$\underline{I}(x) = \frac{\underline{A}_1 e^{\gamma x} - \underline{A}_2 e^{-\gamma x}}{\sqrt{\frac{\underline{z}_V}{\underline{y}_V}}} = \frac{\underline{A}_1 e^{\gamma x} - \underline{A}_2 e^{-\gamma x}}{\underline{Z}_C} \quad (2.114)$$

U (2.114) je uvedena karakteristična impedansa koja se iskazuje u Ω :

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{z}_V}{\underline{y}_V}} \quad (2.115)$$

Treba ukazati da su i karakteristična impedansa i konstanta prostiranja u opštem slučaju kompleksne veličine.

Za tipične nadzemne energetske vodove može se smatrati da je $g_V \approx 0$, a $r_V \ll \omega l_V$, tako da se kompleksni izrazi za konstantu prostiranja i karakterističnu impedansu mogu često u praktičnim proračunima pojednostaviti.

Integracione konstante \underline{A}_1 i \underline{A}_2 se obično izražavaju u funkciji radnog stanja na kraju voda (u funkciji radnih veličina \underline{U}_2 i \underline{I}_2):

$$\underline{U}_2 = \underline{U}(0) = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 \quad ; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{A}_1 - \underline{A}_2}{\underline{Z}_C} \quad (2.116a)$$

Rešavajući jednačine (2.116a) dobija se:

$$\underline{A}_1 = \frac{\underline{U}_2 + \underline{Z}_C \underline{I}_2}{2} \quad ; \quad \underline{A}_2 = \frac{\underline{U}_2 - \underline{Z}_C \underline{I}_2}{2} \quad (2.116b)$$

Smenom konstanti \underline{A}_1 i \underline{A}_2 u jednačine (2.112) nalazi se izraz za napon mestu x :

$$\underline{U}(x) = \left(\frac{\underline{U}_2 + \underline{Z}_C \underline{I}_2}{2} \right) e^{\gamma x} + \left(\frac{\underline{U}_2 - \underline{Z}_C \underline{I}_2}{2} \right) e^{-\gamma x} \quad (2.117)$$

U prethodnim relacijama sabirci tipa $e^{\gamma x}$ predstavljaju upadne talase, a sabirci tipa $e^{-\gamma x}$ reflektovane talase. Upadni talas ima osobinu da sa rastom tekuće koordinate x (koja raste od kraja ka početku voda) njegova amplituda raste baš kao i fazni stav. S druge strane reflektovani talas ima osobinu da njegova amplituda opada sa rastom tekuće koordinate x (koja raste od kraja ka početku voda). Na isti način opada i fazni stav. U bilo kojoj tački duž voda napon je jednak zbiru upadnog i reflektovanog talasa. Analogno važi i za struju duž voda. Isto tako je važno ukazati da se ovo sumiranje može primeniti na sva radna stanja, počev od praznog hoda pa sve do punog opterećenja voda.

Kada se prethodni izraz uredi i uvedu hiperboličke funkcije dobija se:

$$\underline{U}(x) = ch(\gamma x) \underline{U}_2 + \underline{Z}_C sh(\gamma x) \underline{I}_2 \quad (2.118a)$$

$$\underline{I}(x) = \frac{1}{\underline{Z}_C} sh(\gamma x) \underline{U}_2 + ch(\gamma x) \underline{I}_2 \quad (2.118b)$$

Jednačine (2.118a) i (2.118b) omogućavaju proučavanje veoma širokog spektra karakterističnih stanja nadzemnih vodova. Međutim, sa gledišta povezanosti voda kao elementa sistema sa ostalim elementima sistema, pogodnije je vod svesti na ekvivalentno kolo koje se proučava sa aspekta ulaz – izlaz. Prethodne jednačine se iz tih razloga interpretiraju preko $ABCD$ parametara u matricnoj formi:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}(x) \\ \underline{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}(x) & \underline{B}(x) \\ \underline{C}(x) & \underline{D}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.119)$$

gde je:

$$\underline{A}(x) = \underline{D}(x) = ch(\gamma x) \quad (2.120a)$$

$$\underline{B}(x) = \underline{Z}_C \operatorname{sh}(\underline{\gamma}x) \quad (2.120b)$$

$$\underline{C}(x) = \frac{1}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh}(\underline{\gamma}x) \quad (2.120c)$$

Parametri prenosnog voda \underline{A} i \underline{D} su bez dimenzija, parametar \underline{B} ima prirodu impedanse, dok parametar \underline{C} ima prirodu admitanse.

Iz ovih jednačina mogu se dobiti struja i napon u bilo kojoj tački x duž voda u funkciji režima na kraju voda. Ako se pretpostavi da prostorna koordinata raste od kraja ka početku voda, tada za početak voda, gde je $x = L_V$, važi:

$$\underline{U}(L_V) = \underline{U}_1 \quad \underline{I}(L_V) = \underline{I}_1 \quad (2.121)$$

Relacijama (2.121) specificiraju se granični uslovi na kraju 1 voda (predajni kraj). Uvažavanjem relacija (2.121) mogu se relacije (2.119) svesti na matricnu formu tipa jednačina ulaz – izlaz (jednačine četverokrajnika):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \underline{T} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.122)$$

gde je sa \underline{T} označena matrica transformacije kojom se povezuju veličine ulaza i izlaza kod voda kao četverokrajnika i čiji su elementi:

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch}(\underline{\gamma}L_V) \quad (2.123a)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_C \operatorname{sh}(\underline{\gamma}L_V) \quad (2.123b)$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh}(\underline{\gamma}L_V) \quad (2.123c)$$

Zbog potrebe da se sve fizičke veličine koje opisuju stanje na vodu detaljnije opišu potpunije će biti objašnjen pojam talasne dužine. Talasna dužina λ_{tal} se definiše kao određeno rastojanje između dve tačke na vodu potrebno da se faza napona (ili struje) promeni za 2π radijana (odnosno za 360°), imajući pri tome prostornu koordinatu x kao koordinatu od interesa (ne prateći vremensku koordinatu). Identična logika se ima ako se prati bilo upadni bilo reflektovani talas neke od fizičkih veličina. Dakle, naponi i struje se menjaju duž voda saglasno jednostavnim harmonijskim relacijama. Prostorni pun ciklus duž voda, bilo napona, bilo struje, odgovara faznom pomeraju od 2π radijana. Odgovarajuća dužina je baš talasna dužina λ_{tal} . Pošto je β fazna konstanta, u radijanima po jedinici dužine voda, to se ima:

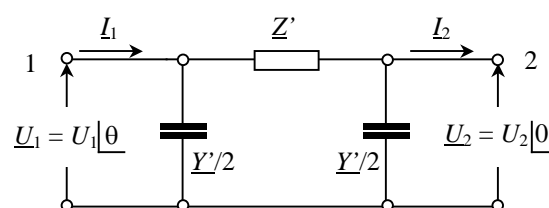
$$\lambda_{tal} = \frac{2\pi}{\beta} \quad (2.124)$$

S druge strane brzina prostiranja v je bliska brzini svetlosti (300000 km/s). Kako takođe važi:

$$v = \lambda_{tal} f \quad (2.125)$$

to se zaključuje da pri frekvenciji $f = 50$ Hz talasna dužina iznosi $\lambda_{tal} = 6000$ km, odnosno fazna konstanta $\beta = 0,06$ /km (odnosno $1,0466 \cdot 10^{-3}$ rad/km).

Za većinu vodova uobičajeno je vršiti analizu radnih stanja na π -šemi voda, u kojoj je redna grana predstava za impedansu voda i s njom je u nekoj relaciji, a otočna grana je predstava za admitansu voda i kao koncentrisani parametar u π -šemi voda, deli se na dve polovine (sl. 2.25). Oznake parametara π -šeme treba razlikovati od oznaka parametara dugačkog voda. Najčešće se usvaja da se parametri π -šeme obeležavaju sa \underline{Z}' i \underline{Y}' , sl. 2.25.



Sl. 2.25 Ekvivalentna π -šema voda

Jednačine napisane po I i II Kirhofovom zakonu, za kolo na sl. 2.25, glase:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{Z}' \left(\underline{I}_2 + \frac{\underline{U}_2 \underline{Y}'}{2} \right) = \left(1 + \frac{\underline{Y}' \underline{Z}'}{2} \right) \underline{U}_2 + \underline{Z}' \underline{I}_2 \quad (2.126)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \frac{\underline{U}_2 \underline{Y}'}{2} + \frac{\underline{U}_1 \underline{Y}'}{2}$$

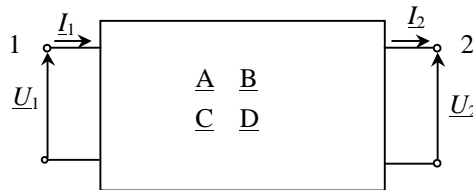
Kombinujući prethodne dve jednačine može se za struju \underline{I}_1 dobiti sledeći izraz:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 + \frac{\underline{U}_2 \underline{Y}'}{2} + \left[\left(1 + \frac{\underline{Y}' \underline{Z}'}{2} \right) \underline{U}_2 + \underline{Z}' \underline{I}_2 \right] \frac{\underline{Y}'}{2} = \\ &= \underline{Y}' \left(1 + \frac{\underline{Y}' \underline{Z}'}{4} \right) \underline{U}_2 + \left(1 + \frac{\underline{Y}' \underline{Z}'}{2} \right) \underline{I}_2 \end{aligned} \quad (2.127)$$

Napisane u matricnoj formi jednačine (2.126) i (2.127) imaju sledeći izgled:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{\underline{Y}' \underline{Z}'}{2} \right) & \underline{Z}' \\ \underline{Y}' \left(1 + \frac{\underline{Y}' \underline{Z}'}{4} \right) & \left(1 + \frac{\underline{Y}' \underline{Z}'}{2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.128)$$

Upoređujući (2.128) sa relacijama (2.122), odnosno sa jednačinama tipa ulaz – izlaz kod četverokrajnika (četvoropola), sl. 2.26, nalaze se direktno odgovarajući parametri četverokrajnika:



Sl. 2.26 Prikaz voda kao četverokrajnika

$$\underline{A} = \underline{D} = \left(1 + \frac{\underline{Y}' \underline{Z}'}{2} \right) \quad (2.129a)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}' \quad (2.129b)$$

$$\underline{C} = \underline{Y}' \left(1 + \frac{\underline{Y}' \underline{Z}'}{4} \right) \quad (2.129c)$$

Treba ukazati da za sve vodove važi relacija :

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1 \quad (2.130)$$

Relacija (2.130) predstavlja vrednost determinante matrice transformacije \mathbf{T} , koju čine parametri četverokrajnika. Očividno je da se lako nalazi i inverzna matrica. Prednost predstavljanja u matricnoj formi je očita ako se ima u vidu da je za rednu vezu dva četverokrajnika (dva voda) ekvivalentna matrica \mathbf{T} (matrica kaskade) jednaka proizvodu pojedinačnih matrica voda. Rezultat dobijen u relaciji (2.130) važi u opštem slučaju za linearne pasivne četverokrajnike i pogodan je za analitičke kontrole rezultata proračuna.

Poređenjem (2.123b) sa (2.129b) vidi se da se parametar \underline{B} , kod π -šeme voda, svodi na impedansu redne grane, odnosno na:

$$\underline{B} = \underline{Z}' = \underline{Z}_C \operatorname{sh} \gamma L_V \quad (2.131a)$$

Za kratke i srednje duge vodove (to je slučaj koji je u praksi od posebnog interesa) važi $\gamma L_V \ll 1$, pa onda sledi da se $\operatorname{sh} \gamma L_V$ može aproksimirati sa γL_V , što daje:

$$\underline{Z}' \approx \underline{Z}_C \underline{\gamma} L_V \approx \sqrt{\frac{\underline{Z}_V}{\underline{Y}_V}} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V} \approx \underline{Z}_V \quad (2.131b)$$

Naravno, \underline{Z}_V je originalni, polazni parametar voda (relacija 2.108. specificira ovaj parametar kao podužnu vrednost) a \underline{Z}' je impedansa redne grane π -šeme voda. Prethodnom analizom je pokazano da su ta dva parametra, za kratke i umereno duge vodove, gotovo ista.

Poređenjem izraza (2.123a) i izraza (2.129a) dobija se:

$$\underline{Y}' = \frac{2}{\underline{Z}_C} \frac{ch\gamma L_V - 1}{sh\gamma L_V} \quad (2.132a)$$

Prethodni izraz za admitansu otočne grane π -šeme (naravno da se sada lako dobija polovina ove admitanse) može se i drugačiji analitički prikazati, ako se uvaži sledeći identitet koji važi za hiperboličke funkcije:

$$th \frac{t}{2} = \frac{cht - 1}{sht} \quad (2.133a)$$

Primenom se dobija:

$$\frac{\underline{Y}'}{2} = \frac{1}{\underline{Z}_C} th \frac{\gamma L_V}{2} \quad (2.133b)$$

Ponovo imajući u vidu da je u praksi, za kratke i srednje duge vodove, prihvatljiva pretpostavka $\underline{\gamma} L_V \ll 1$, tada sledi da se $th \frac{\gamma L_V}{2}$ može aproksimirati sa $\frac{\gamma L_V}{2}$, što daje:

$$\frac{\underline{Y}'}{2} \approx \frac{1}{\underline{Z}_C} \frac{\gamma L_V}{2} \approx \sqrt{\frac{\underline{Y}_V}{\underline{Z}_V}} \frac{\sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V}}{2} \approx \frac{\underline{Y}_V}{2} \quad (2.132b)$$

Naravno, ponovo treba ukazati da je \underline{Y}_V originalni parametar voda (ukupna otočna admitansa dobijena kao proizvod podužne otočne admitanse i dužine voda), a da je \underline{Y}' admitansa otočne grane π -šeme voda. Iz prethodne analize se ponovo vidi da su ta dva parametra, za kratke i umereno duge vodove, gotovo ista.

Aproksimacije $sh\gamma L_V$ sa γL_V i $th\gamma L_V$ sa $\frac{\gamma L_V}{2}$ se mogu smatrati za inženjerski prihvatljive ako je zadovoljeno:

– za nadzemne vodove: $L_V < (10000)/f$ km, gde se za datu numeričku vrednost učestanost f treba smeniti u Hz da bi se dužina nadzemnog voda L_V dobila u km. Za nadzemne vodove sa učestanošću od 50 Hz ova aproksimacija važi za dalekovode kraće od 200 km.

– za kablovske vodove: $L_K < (3000)/f$ km, gde se za datu numeričku vrednost učestanost f treba smeniti u Hz da bi se dužina kabla L_K dobila u km. Za kablovske vodove sa učestanošću od 50 Hz ova aproksimacija važi za kablove kraće od 60 km.

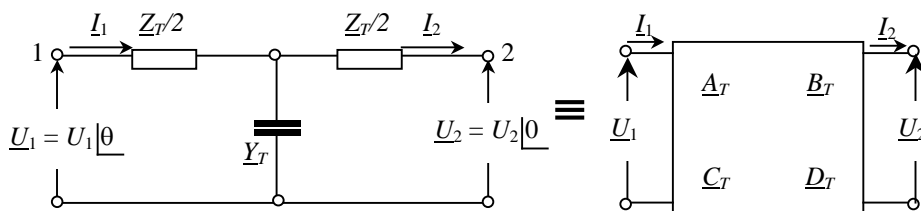
Na sličan način kako je to urađeno sa parametrima π -šeme, izvode se i parametri T-šeme nadzemnog voda (koji će biti razlikovani sa indeksom T , koji se samo na ovom mestu koristi za ovu šemu, inače je rezervisan kao oznaka za transformator):

$$\underline{A}_T = 1 + \frac{\underline{Y}_T \underline{Z}_T}{2} = \underline{D}_T \quad (2.134a)$$

$$\underline{B}_T = \underline{Z}_T \left(1 + \frac{\underline{Y}_T \underline{Z}_T}{4} \right) \quad (2.134b)$$

$$\underline{C}_T = \underline{Y}_T \quad (2.134c)$$

Ekvivalentna T-šema je prikazana na sl. 2.27.



Sl. 2.27 Ekvivalentna T-šema voda

Nadzemni vodovi se obično klasifikuju prema dužini, a prema uvedenim aproksimacijama koje se primenjuju pri njihovom modelovanju. Tako se u principu imaju:

– *kratki vodovi* dužine do 80 km, sa zanemarivim parametrima otočne grane. Oni se tipično ekvivalentiraju samo sa rednom impedansom voda, \underline{Z}_V , ili čak samo sa rednom reaktansom voda, što je čest slučaj kod proračuna struja kratkih spojeva, sl. 2.28a) i b).

– *vodovi srednje dužine* sa dužinama od 80 do 200 km. Oni se modeluju π - ili T-šemom, saglasno sl. 2.25. i 2.27. Za njih se u principu ne uvode koeficijenti popravke.

– *dugački vodovi* od preko 200 km koji se ekvivalentiraju π -šemom sa punim izrazima (2.123a,b,c) ili sa uvođenjem skalarnih ili kompleksnih koeficijenata popravke.

Za umereno duge vodove (preko 200 km pa sve do 600 km) u već definisane pogonske parametre uvode se skalarni koeficijenti popravke kojima se efekat raspodeljenosti (koji je na vodovima realnost) na pogodan način respektuje:

$$\begin{aligned}\underline{z}_V &= k_R r_V + j k_X x_V \\ \underline{y}_V &= g_V + j k_B b_V\end{aligned}\quad (2.135)$$

Pomoću koeficijenata popravke k_R , k_X i k_B se uzima, dakle, u obzir raspodeljenost parametara. Radi njihovog izračunavanja formalno matematički se hiperboličke zavisnosti aproksimiraju sa prva dva člana razvoja u red.

Izračunavanjem se sada lako nalaze skalarni koeficijenti popravke (ovde prikazani za ukupne parametre voda), i oni iznose:

$$\begin{aligned}k_R &= 1 - \frac{X_V B_V}{3} \\ k_X &= 1 - \frac{1}{6} X_V B_V \left(1 - \frac{R_V^2}{X_V^2} \right) \\ k_B &= 1 + \frac{X_V B_V}{12}\end{aligned}\quad (2.136)$$

Za jako duge vodove (dužina preko 600 km) uvode se kompleksni koeficijenti popravke kojima se množe impedansa redne grane i (polovine) admitansi otopnih grana da bi se dobile tačnije vrednosti parametara. Ovi kompleksni koeficijenti računaju se kao:

$$\underline{Z}' = \underline{k}_Z \underline{Z}_V = \underline{Z}_C \operatorname{sh} \gamma L_V = \sqrt{\frac{\underline{Z}_V}{\underline{Y}_V}} \operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V} = \frac{\operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V}}{\sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V}} \underline{Z}_V \quad (2.137a)$$

$$\begin{aligned}\underline{Y}' = \underline{k}_Y \underline{Y}_V &= \frac{2}{\underline{Z}_C} \frac{\operatorname{ch} \gamma L_V - 1}{\operatorname{sh} \gamma L_V} = 2 \sqrt{\frac{\underline{Y}_V}{\underline{Z}_V}} \frac{\operatorname{ch} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V} - 1}{\operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V}} = \\ &= \frac{2(\operatorname{ch} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V} - 1)}{\sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V} \operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V}} \underline{Y}_V\end{aligned}\quad (2.137b)$$

Prema tome, dobija se da su kompleksni koeficijenti popravke:

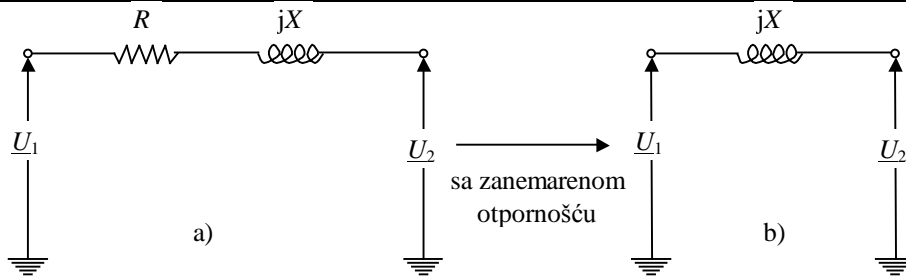
$$\begin{aligned}\underline{k}_Z &= \frac{\operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V}}{\sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V}} \\ \underline{k}_Y &= \frac{2(\operatorname{ch} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V} - 1)}{\sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V} \operatorname{sh} \sqrt{\underline{Z}_V \underline{Y}_V}}\end{aligned}\quad (2.138)$$

Za uprošćenu šemu voda prikazanu na sl. 2.28 lako se pokazuje da parametri četverokrajnika imaju sledeće vrednosti:

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 \quad (2.139a)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_V \quad (2.139b)$$

$$\underline{C} = 0 \quad (2.139c)$$



a) šema sa zanemarenim otočnim granama

Sl. 2.28 Uprošćene šeme voda
 b) šema sa zanemarenom aktivnom otpornošću u rednoj grani i zanemarenim otočnim granama

3. Model potrošnje u analizi EES

Potrošački podsistem ili kraće potrošnja predstavlja poslednji blok u tehnološkom lancu u okviru EES. Osnovni razlog postojanja EES svodi se na sigurno, pouzdano, kvalitetno i ekonomično zadovoljavanje potreba potrošnje. Postavlja se prirodno pitanje kako modelovati odnosno ekvivalentirati potrošnju sa stanovišta potreba u analizi EES. Potrošnju, ili kako se to često kaže, konzum, čini zbirni odziv različitih prijemnika (uređaja) veoma širokog spektra. Radi se o prijemnicima različitih namena i snaga kojih se u domaćinstvima može identifikovati nekoliko stotina, a u raznim industrijama još mnogo više. Bilo kakva klasifikacija podložna je uprošćenjima ali se bez obzira na to prijemnici mogu grupisati na različite načine. Sa aspekta finalne primene električne energije mogu da se izdvoje primene uređaja za osvetljenje, uređaja za pokretanje (motori i drugi uređaji), uređaja za proizvodnju toplotne energije ili energije za rashlađivanje, uređaja za elektronska kola i druge primene. Sa aspekta administriranja sistemom odnosno sa aspekta vođenja određene tarifne politike svi prijemnici sa različitim primenama mogu da se grupišu u karakteristične celine kao što su **široka potrošnja**, kojoj pečat daju domaćinstva i komercijalno-administrativni sektor, **industrija** sa svim svojim specifičnostima, potrošnja u **saobraćaju** i potrošnja u **poljoprivredi** i pratećim prehrambenim industrijama.

Zahtevi potrošača nisu konstantni i menjaju se sa prirodnim dnevnim i sezonskim ciklusima u potrebama konzuma. U osnovi se ove promene prikazuju kao promene snaga ili struja u funkciji vremena. Ovakvi promenljivi zahtevi potrošača uslovljavaju i različita radna stanja u sistemu. Za potrebe analize EES moguće je identifikovati više karakterističnih radnih stanja ili kako se to drugačije kaže, više radnih režima. U zavisnosti da li su ova radna stanja stacionarna ili prelazna moguće im je pridružiti odgovarajući model potrošačkog područja, odnosno konzuma. Moguće je izdvojiti sledeće režime od većeg interesa za analizu EES-a:

- Režim maksimalnog opterećenja (radno stanje koje odgovara maksimalnom opterećenju). U našem EES to je zimski maksimum, odnosno maksimalno vršno opterećenje koje pada u zimskoj sezoni.
- Režim minimalnog opterećenja (radno stanje koje odgovara minimalnom opterećenju). U našem EES to je letnji minimum, odnosno minimalno opterećenje koje pada leti u noćnom pogonu.
- Režim ekonomičnog opterećenja (koji se sa inženjerske tačke može formulisati kao režim u kojem se optimalno koriste izgrađeni kapaciteti kako sa aspekta investicionih ulaganja tako i sa aspekta gubitaka aktivne snage, odnosno eksploatacionih troškova).
- Režim prenosa prirodne snage na nekom od vodova (koji se karakteriše punom ravnotežom reaktivnih snaga, drugim rečima sva reaktivna snaga koju proizvode otočni kapaciteti voda potroši se u rednim induktivitetima voda).
- Režim nominalnog opterećenja nekih od elemenata sistema, npr. generatora ili transformatora.
- Režim praznog hoda nekog od elemenata sistema ili delova sistema.
- Režim kratkog spoja na nekom od elemenata sistema.

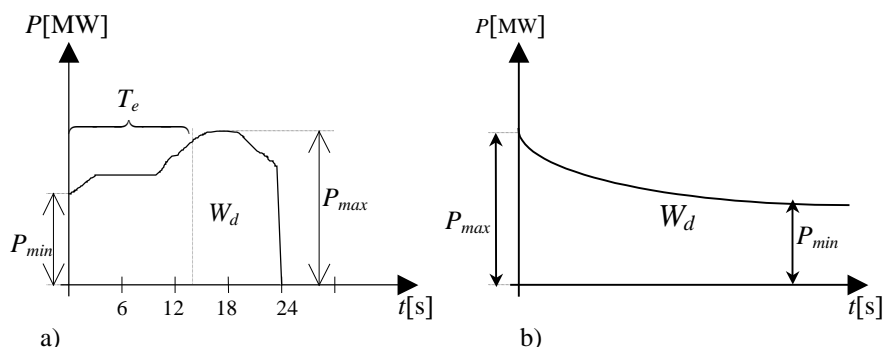
U cilju preciznijeg terminološkog određenja ovih režima korisno je uvesti dva pojma koji opisuju radnu tačku sistema, tj. radni režim. To su:

- radne veličine, odnosno promenljive inherentno pridružene odabranom radnom stanju, kao što su: naponi, struje, snage i uglovi (odnosno fazni stavovi odgovarajućih fazora),
- parametri sistema: impedanse i admitanse u stacionarnim stanjima (rezistansa, reaktansa, konduktansa i susceptansa), odnosno odgovarajuće induktivnosti i kapacitivnosti u proračunima prelaznih stanja.

Parametri sistema u osnovi ne zavise od radnog stanja. Preciznosti radi, konduktansa i rezistansa se nešto menjaju sa vremenskim prilikama, temperaturom provodnika i sa opterećenjem pojedinih elemenata sistema. Susceptansa se malo menja sa promenom ugiba provodnika nadzemnih vodova, ali su te promene veoma male i za analizu stacionarnih (pa i prelaznih) stanja praktično bez uticaja.

Važno je ukazati da se u analizi EES mogu izdvojiti i mnogi drugi režimi pošto opterećenje varira tokom dana u skladu sa ciklusom dnevnih aktivnosti a takođe varira i po sezonama prateći vremenske prilike u meteorološkom smislu.

Dnevni dijagram opterećenja daje informacije o promenama opterećenja tokom dana, a kao opterećenje može se analizirati prividna snaga S , (kao modul kompleksne snage \underline{S}), aktivna snaga P , reaktivna snaga Q ili struja I , (kao modul kompleksne struje ili kao aktivna i reaktivna komponenta struje).



Sl. 3.1 Hronološki (a) i uređeni (b) dnevni dijagrami opterećenja

Opterećenja se za potrebe eksploatacije sistema obično registruju svakih 15 minuta. To se može tako izvesti da se registruje brojičnom izmerna potrošena energija na svakih 15 minuta, a zatim se ta izmerna energija podeli sa 1/4h što kao rezultat daje snagu (koja reprezentuje opterećenje).

Karakterističan dnevni dijagram opterećenja prikazan je na sl. 3.1 gde je sa W_d označena ukupna dnevna utrošena energija, sa P_{max} maksimalno (vršno) dnevno opterećenje a sa P_{min} minimalno dnevno opterećenje. Dnevni dijagram prikazan je i kao hronološki (opterećenja se registruju po redosledu pojavljivanja, na sl. 3.1a), ili uređeni (odnosno dnevni dijagram trajanja opterećenja, na sl. 3.1b) u kome su opterećenja uređena u opadajući niz. Dnevni dijagram je u osnovi određen sa tri informacije: P_{max} , P_{min} i W_d . Ukupna dnevna energija se nalazi kao:

$$W_d = \int_0^{24} P(t) dt \quad (3.1)$$

Pored ovih pokazatelja uvodi se i relativni pokazatelj:

$$m = \frac{W_d}{24P_{max}} = \frac{P_{sr}}{P_{max}} \quad (3.2)$$

Sa m je označen faktor opterećenja (ili faktor oblika) koji kvantifikuje stepen popunjenosti pravougaonika (P_{max} , T), a pokazuje koliko se kapaciteti sistema efektivno koriste. Formalno se faktor opterećenja izračunava kao količnik srednje i maksimalne snage na karakterističnom vremenskom intervalu. Idealno korišćenje kapaciteta ima se za $m = 1$. Vrednost $m = 0,75$ odgovara tzv. distributivnom faktoru opterećenja. Tipične systemske vrednosti za faktor opterećenja variraju sa sezonom i kreću se od 0,50 do 0,80. U eksploataciji sistema se teži da se ostvare više vrednosti faktora opterećenja u cilju podizanja efektivnosti korišćenja kapaciteta. Načini da se to ostvari dele se na dve velike grupe. Prvu čine postupci direktnog upravljanja potrošnjom putem uključivanja i isključivanja nekih potrošača u cilju smanjenja vršnog opterećenja (misli se vršnog dnevnog opterećenja). Drugu grupu mera čine postupci indirektnog upravljanja potrošnjom putem tarifnog sistema kojima se podstiče potrošnja u noćnim periodima, a destimuliše u periodima dnevnog vršnog opterećenja. I jedni i drugi postupci, odnosno upravljanje potrošnjom kao posebna celina, čini danas jedan od najvažnijih pravaca razvoja savremenih EES-a, pošto se uspešnom primenom ovih postupaka odlažu investicije u skupe proizvodne, prenosne i distributivne kapacitete.

Pored faktora opterećenja kao izvedeni pokazatelj koristi se i ekvivalentno vreme trajanja vršnog (maksimalnog) opterećenja (fiktivno trajanje vrha). Ako se ono obeleži sa T_e tada se ima:

$$W_d = T_e P_{max} \Rightarrow T_e = \frac{W_d}{P_{max}} \quad (3.3)$$

Osim dnevnog dijagrama opterećenja koriste se i sedmični, mesečni, sezonski i godišnji dijagrami opterećenja. Najviše su u upotrebi dnevni i godišnji dijagrami. Karakteristični pokazatelji uvedeni za dnevni dijagram opterećenja analogno se mogu definisati i za ostale dijagrame. Tako se na godišnjem horizontu definiše:

$$T_e^{god} = \frac{W^{god}}{P_{max}^{god}} \quad (3.4)$$

kao godišnje iskorišćenje vršne snage.

U opštem slučaju aktivne i reaktivne snage koje uzima neko potrošačko područje su funkcija napona i učestanosti. U analizi se zahteva da bez obzira na složenost potrošnje u širem smislu (termička potrošnja, osvetljenje, energetska elektronika, motori, kompresori, elektronska kola, elektrolučne peći,...) ipak postoje tipična ponašanja koja se modelima potrošnje mogu identifikovati. Korektnu procenu sastava prijemnika u složenom potrošačkom centru je teško uraditi pošto ona varira sa dobom dana, sa sezonom i sa intenzitetom rada industrije. Međutim, čak i da se zna tačan sastav prijemnika bilo bi krajnje nepraktično modelovati svaki prijemnik posebno. Zato se vrše tipična grupisanja. Pošto aktivna snaga zavisi od napona i učestanosti:

$$P_p = f_p(U, f) \quad (3.5)$$

to se promene aktivne snage nalaze kao:

$$dP_p = \frac{\partial P_p}{\partial U} dU + \frac{\partial P_p}{\partial f} df \quad (3.6)$$

Ova relacija važi za istovremenu promenu i napona i učestanosti. U slučajevima kada je učestanost konstantna ima se:

$$dP_p = \frac{\partial P_p}{\partial U} dU \quad (3.7)$$

Naravno, kada je napon konstantan dobija se jednostavno:

$$dP_P = \frac{\partial P_P}{\partial f} df \quad (3.8)$$

Analogno prethodnom, reaktivna snaga je takođe funkcija napona i učestanosti:

$$Q_P = f_Q(U, f) \quad (3.9)$$

U analizi EES promene napona U i učestanosti f se posmatraju odvojeno. Potrošački centar na te promene odaziva različito i odziv je uslovljen strukturom potrošača.

3.1. Vrste prijemnika

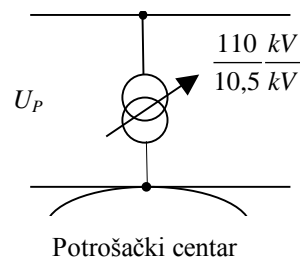
U narednoj podeli identifikovane su tri vrste prijemnika (uređaja) koje se imaju kako u kategoriji domaćinstva, tako i u administrativno – komercijalnoj kategoriji, a takođe i u kategorijama industrija, saobraćaj i poljoprivreda. Te tri vrste prijemnika su:

- I - Termički aparati zajedno sa osvetljenjem (sijalice sa užarenom niti),
- II - Asinhroni motori i
- III - Sva ostala potrošnja.

Treba ukazati da iako ovakva podela nije perfektna ona ipak omogućava da se izdvoje vrste prijemnika primerene analizi u vezi sa varijacijama napona i učestanosti. U zavisnosti od karaktera ovih varijacija karakteristike potrošačkog centra mogu biti ili statičke ili dinamičke. Podela je ponovo uslovna i odnosi se na brzinu dešavanja promena. Dinamičke karakteristike se određuju ne samo u funkciji promena napona i učestanosti, već i u funkciji njihovih prvih izvoda (brzina promena). U narednoj analizi od interesa su statičke karakteristike potrošnje, koje odgovaraju sporim promenama potrošnje, odnosno promene koje ne interferiraju sa elektromagnetnim prelaznim pojavama (promene sa vremenskim konstantama većim od nekoliko desetina ms). Dinamičke karakteristike potrošnje od značaja su posebno kod analiza naponske stabilnosti, odnosno naponskog sloma kad i dinamika igra uticajnu ulogu.

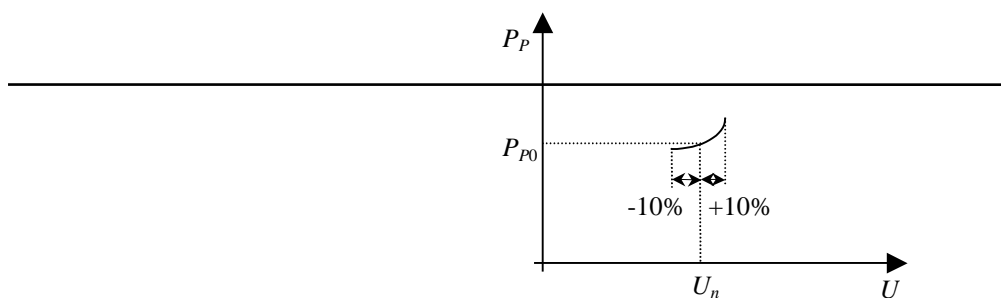
3.2. Statičke naponske karakteristike potrošnje

Statičke karakteristike potrošnje u funkciji promene napona snimaju se relativno jednostavno. U principu varira se napon na ulazu u dati potrošački centar prema pojednostavljenoj interpretaciji prikazanoj na sl.3.2



Sl. 3.2 Karakteristična šema vezivanja potrošačkog centra

U principu se razmatra dijapazon promena napona u granicama od $0,9U_n$ pa do $1,1U_n$, odnosno napon se varira za $\pm 10\%$ oko U_n .



Sl. 3.3 Ilustracija dozvoljenih varijacija napona i odgovarajućih promena aktivne snage

U normalnim radnim stanjima dozvoljeni padovi napona obično su do 5%, ali pošto se u posthavarijskim stanjima dopuštaju i veći padovi napona to se kod analize statičkih naponskih karakteristika potrošnje prate procentualna odstupanja od 10% u odnosu na nominalni napon (pokazuje se da ovakvi analitički pristupi zadovoljavaju i za odstupanja napona u granicama do 20%). U principu se mogu snimiti eksperimentalne krive kao prvi korak u analizi, a zatim se one nastoje aproksimirati sa nekom analitičkom funkcijom. Pokazuje se da su eksponencijalne funkcije sasvim pogodne za ove aproksimacije pa se zadatak analitičke identifikacije kod ovih varijacija svodi na nalaženje koeficijenata u sledećim eksponencijalnim zavisnostima:

$$\begin{aligned} P_P &= C_{PU} U^{k_{PU}} \\ Q_P &= C_{QU} U^{k_{QU}} \end{aligned} \quad (3.10)$$

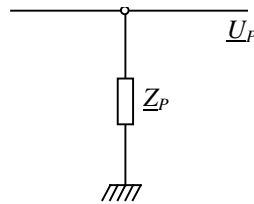
Variranjem koeficijenata k_{PU} (statički koeficijent promene aktivne snage P sa promenama napona U) može se pokriti celokupno područje od interesa kao što je to ilustrovano na sl. 3.3 Sličan rezon važi i za variranje statičkog koeficijenta promene reaktivne snage Q sa promenama napona U , koeficijenta k_{QU} . Konstante tipa C u prethodnim relacijama mogu se odrediti postupkom minimizacije sume kvadrata odstupanja analitičkih krivih u odnosu na eksperimentalne. Kod malih promena napona, analize se vrše prema nagibima tangenti, odnosno vrši se linearizacija karakteristika oko radne tačke. Radna tačka je na sl. 3.3 obeležena sa (U_m, P_{P0}) . Postupkom linearizacije se dobija:

$$\frac{dP_P}{dU} = k_{PU} C_{PU} U^{(k_{PU}-1)} = k_{PU} C_{PU} \frac{U^{k_{PU}}}{U} = k_{PU} \frac{P_P}{U} \quad (3.11)$$

Veličine P_P i U u ovoj analizi predstavljaju poznate radne veličine koje se nalaze iz specificiranog radnog stanja, npr. U_n i P_{P0} . Ako se poznaje k_{PU} , onda se zna i nagib tangente u toj karakterističnoj tački koji je jedina nepoznata u prethodnoj formuli.

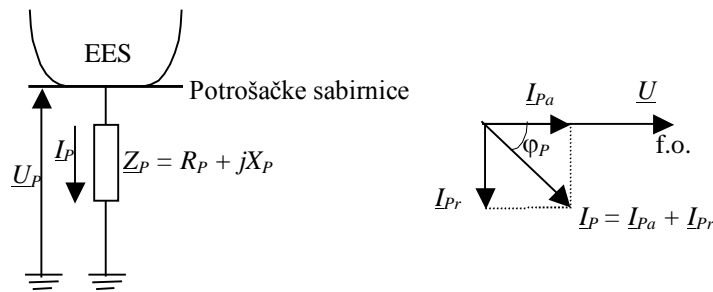
Sa formalne tačke gledišta statički koeficijent promene aktivne snage P sa promenama napona U , k_{PU} , analizira se za tri karakteristična slučaja.

Prvi slučaj od interesa je slučaj konstantne impedanse, $Z_P = const$.

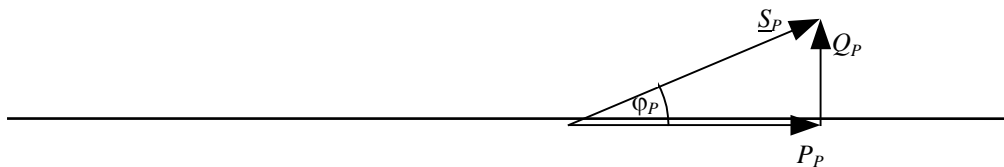


Sl. 3.4 Modelovanje potrošnje konstantnom impedansom

Sa gledišta modelovanja potrošačkog centra jedna od varijanti u kojoj se ovakav model pojavljuje jeste situacija sa čisto termogenom otpornošću kao reprezentom potrošačkog područja i ovaj slučaj bi se imao na sl. 3.4 kada je $Z_P = R_P$ (pretpostavlja se da je udeo reaktanse u tom slučaju u impedansi jednak nuli). U praksi je veoma čest slučaj induktivnog karaktera potrošnje, što je ilustrovano na sl. 3.5.



Sl. 3.5 Primer potrošačkog područja sa induktivnim opterećenjem



Sl. 3.6 Karakteristični trougao snaga

Kompleksna snaga koju uzima potrošački centar je očevidno:

$$\underline{S}_P = \underline{U}_P \underline{I}_P^* = \underline{U}_P \frac{\underline{U}_P^*}{\underline{Z}_P^*} = \frac{U_P^2}{\underline{Z}_P^*} \quad (3.12)$$

gde su:

\underline{S}_P - trofazna kompleksna snaga,

\underline{U}_P - međufazni (linijski) napon,

\underline{I}_P - računaska struja, (struja čiji je moduo $\sqrt{3}$ puta veći od modula fazne struje potrošačkog centra, pod pretpostavkom da su prijemnici vezani u zvezdu) i

\underline{Z}_P - impedansa potrošnje kao parametar po fazi. (Definicija računskih veličina u analizi EES se uvodi u Poglavlju 4).

U prethodnoj relaciji, kako se to danas u analizi EES gotovo bez izuzetka radi, konjugovana je struja, tako da se za $Q_P > 0$ dobija reaktivna induktivna snaga.

Uz korišćenje i trougla snaga, sl. 3.6, dalje se dobija da je:

$$\underline{Z}_P = \frac{U_P^2}{S_P^*} = \frac{U_P^2}{S_P e^{-j\varphi_P}} = \frac{U_P^2}{S_P} e^{j\varphi_P} \quad (3.13a)$$

$$\underline{Z}_P = \frac{U_P^2}{S_P} (\cos\varphi_P + j\sin\varphi_P)$$

$$\underline{Z}_P = \frac{U_P^2}{S_P} \left(\frac{P_P}{S_P} + j \frac{Q_P}{S_P} \right) = \frac{U_P^2}{P_P^2 + Q_P^2} (P_P + jQ_P) \quad (3.13b)$$

Kako je $S_P = f(U_P)$ to se uz uvažavanje (3.11) dalje dobija:

$$\frac{dS_P}{dU} = \frac{d(P_P + jQ_P)}{dU} = \frac{d\left(\frac{U^2}{\underline{Z}_P^*}\right)}{dU} = \frac{d\left(\frac{U^2 e^{j\varphi_P}}{Z_P}\right)}{dU} = 2 \frac{U}{Z_P} e^{j\varphi_P} = 2 \frac{S_P}{U} \quad (3.14a)$$

Iz (3.14a) direktno sledi:

$$\frac{dS_P}{dU} = 2 \frac{P_P + jQ_P}{U}$$

odnosno dobija se:

$$\frac{dP_P}{dU} = 2 \frac{P_P}{U} = k_{PU} \frac{P_P}{U} \Rightarrow k_{PU} = 2 \quad (3.14b)$$

Iz prethodnog se vidi da se statički koeficijent k_{PU} nalazi kroz očitavanje eksponenta napona u izrazu za potrošnju. Analogno se ima za statički koeficijent promene reaktivne snage sa naponom, u slučaju konstantne impedanse:

$$\frac{dQ_P}{dU} = 2 \frac{Q_P}{U} = k_{QU} \frac{Q_P}{U} \Rightarrow k_{QU} = 2 \quad (3.15)$$

Na osnovu prethodnih analiza se zaključuje da se, u slučajevima kad se potrošnja modeluje konstantnom impedansom, statička karakteristika potrošnje svodi na parabolu.

Drugi slučaj od interesa je slučaj konstantne snage, $P_P = const$. Da bi aktivna snaga potrošačkog područja, P_P , prema relaciji (3.10), ostala konstantna sa promenama napona, odnosno da snaga ostane analitički nepromenjena pri varijacijama napona, mora koeficijent k_{PU} da bude jednak nuli.

Treći slučaj od interesa je slučaj konstantne struje, $I_P = const$. Imajući u vidu da važi:

$$\underline{S}_P = \underline{U}_P^1 \underline{I}_P^* \Rightarrow k_{PU} = 1 \quad (3.16)$$

Zaključuje se, saglasno prethodnim analizama, da je uslov za postojanje konstantne struje da eksponent (stepen) napona u izrazu za snagu bude 1, a što dalje znači da je vrednost statičkog koeficijenta potrošnje u ovom slučaju $k_{PU} = 1$.

Koji je od ova tri modela najprimereniji i koji kada treba da se koristi, zavisi od prirode potrošačkog područja. Brojčane vrednosti za k_{PU} su, dakle, u opsegu: $0 \leq k_{PU} \leq 2$. Kod realnih potrošačkih centara mora se poznavati struktura potrošnje, tj. učesće kategorija I, II i III u ukupnoj potrošnji.

Kod kategorije I najadekvatniji model je onaj koji odgovara konstantnoj impedansi, što teorijski daje $k_{PU_I} = 2$. Kod realne potrošnje vrednosti ovog koeficijenta su u granicama od 1,8 do 1,6, pošto se u praksi retko ima čisto termogen odziv potrošačkog centra.

Kod kategorije II može se pojednostaviti analiza tako da se analiziraju prilike kod kojih asinhroni motor ima konstantan moment, dakle da je $M = const$. Pri konstantnoj brzini obrtanja zaključuje se da je i snaga približno konstantna ($P \approx const$). Prema tome teorijski se može uzeti da je $k_{PU_{II}} = 0$. Realne vrednosti u praksi su oko 0,3 (jer u praksi niti je moment perfektno konstantan, niti je moguće izdvojiti potrošačko područje sa potrošnjom sastavljenom samo od asinhronih motora).

Kod kategorije III, koja obuhvata svu ostalu potrošnju, važi: $0 \leq k_{PU_{III}} \leq 2$, pošto se ovde ne može preciznije specificirati struktura i tip prijemnika.

Ako se kao zadatak postavi nalaženje ekvivalentnog k_{PU} za slučaj složenog potrošačkog područja, tada je najpre potrebno poznavati učešće kategorija I, II i III u ukupnoj potrošnji. Ovo se radi ili prema iskustvu osoblja koje vodi određeni konzum, prema procenama baziranim na poznavanju konzuma kroz obračunska merenja ili prema studijama razvoja mreže na analiziranom potrošačkom području ili na osnovu nekih sličnih informacija. U osnovi je, dakle, ova analiza bazirana na inženjerskoj proceni učešća pojedinih kategorija u zbirnoj potrošnji i sledećem analitičkom razmišljanju u kome se pretpostavlja da se može razmatrati i veći broj kategorija od prethodno uvedene tri kategorije:

$$\begin{aligned} \frac{dP_P}{dU} &= \sum_{i=1}^n \frac{dP_{P_i}}{dU} = \frac{dP_{P_I}}{dU} + \frac{dP_{P_{II}}}{dU} + \frac{dP_{P_{III}}}{dU} + \dots = \\ &= \sum_{i=1}^n k_{PU_i} \frac{P_{P_i}}{U} = k_{PU_I} \frac{P_{P_I}}{U} + k_{PU_{II}} \frac{P_{P_{II}}}{U} + k_{PU_{III}} \frac{P_{P_{III}}}{U} + \dots = k_{PU_{\Sigma}} \frac{P_P}{U} \end{aligned} \quad (3.17)$$

U (3.17) sa n je obeležen ukupan broj svih kategorija potrošnje. Posle množenja sa U/P_P sa naponom dobija se:

$$k_{PU_{\Sigma}} = k_{PU_I} \frac{P_{P_I}}{P_P} + k_{PU_{II}} \frac{P_{P_{II}}}{P_P} + k_{PU_{III}} \frac{P_{P_{III}}}{P_P} + \dots \quad (3.18)$$

Radi ilustracije primene formule (3.18) biće obrađena dva karakteristična primera.

1) U prvom primeru neka je u pitanju administrativno-komercijalna kategorija potrošnje u kojoj se tipično ima sledeća struktura učešća potrošača (u procentima) po kategorijama:

I - 50% II - 30% III - 20%

Za ovakvu strukturu ekvivalentni koeficijent statičke potrošnje po naponu je (ako se pretpostavi da je k_{PU} jednak 1 za kategoriju ostala potrošnja):

$$k_{PU_{\Sigma}} = 0,5 \cdot 2 + 0,3 \cdot 0,3 + 0,2 \cdot 1 \approx 1,29$$

Detaljnije analize pokazuju da se kod ovakve strukture tipično ima da je $k_{PU_{\Sigma}}$ između 1,1 i 1,3.

2) U drugom primeru neka je u pitanju industrijska potrošnja sa sledećom tipičnom strukturom učešća potrošača (u procentima) po kategorijama:

I - 30% II - 70%

Prema ovim podacima a primenom formule (3.18) analitički se može izračunati: $k_{PU_{\Sigma}} = 0,3 \cdot 2 + 0,7 \cdot 0,3 \approx 0,9$.

U ovakvim slučajevima detaljnije analize pokazuju da se za $k_{PU_{\Sigma}}$ dobijaju vrednosti između 0,7 i 0,9.

Ako se kojim slučajem raspolaže sa eksperimentalno snimljenim zavisnostima aktivne snage u funkciji napona, $P_P = f(U)$ tada se nalaženjem nagiba tangenti lako procenjuju statički koeficijenti zavisnosti aktivne snage po naponu, k_{PU} .

Zaključuje se da se za dobro modelovanje potrošnje mora poznavati struktura potrošačkog centra. Ako se potrošački centar zamenjuje sa $Z_P = const$, tada je potrebno proceniti greške koje se tu čine, pošto one mogu da budu značajne kako je ukazala i prethodna inženjerska analiza.

Naredna analiza odnosi se na promene reaktivne snage sa naponom, koje se po analogiji kvantifikuju kroz statički koeficijent zavisnosti reaktivne snage od napona, k_{QU} . Za kategoriju I, koja se odnosi na termičku potrošnju, ima se da je $Q_{P_I} = 0$, pošto po prirodi stvari ova kategorija ne uzima nikakvu reaktivnu snagu.

Glavni pečat potrošnji reaktivne (induktivne) snage daju asinhroni motori koji se nalaze u kategoriji II. Asinhroni motori čine najveću grupu potrošača u industrijskom konzumu (čak do 75% ukupne potrošnje u industriji), a u konzumu komercijalno-administrativne potrošnje učestvuju i do 50%. U ukupnoj potrošnji električne energije asinhroni motori učestvuju sa 45-50%, tako da je njihovo ponašanje od suštinskog značaja u smislu reaktivnog konzuma. Interesantno je ukazati da od ukupne potrošnje koju čine asinhroni motori 75-80% otpada na asinhronne motore na niskom naponu (0,4 kV). Drugi po značaju potrošač reaktivne snage u prenosnim i distributivnim mrežama je transformator, ali se on proučava kao element sistema a ne kao deo potrošačkog centra, ~~tako da se u kontekstu reaktivne potrošnje neće detaljnije razmatrati na ovom mestu.~~

Kod asinhronog motora postoje dve fenomenološki različite pojave u pogledu potrošnje reaktivne snage i to magnećenje i rasipanje. Što se magnećenja tiče struja magnećenja, I_{μ} je veća kod asinhronih motora nego kod transformatora zbog postojanja međugvožđa. Treba podsetiti da je struja magnećenja tipično $I_{\mu} \cong 1\%$ (u odnosu na nominalnu struju transformatora) kod većih transformatora, dok je kod manjih transformatora ona nekoliko procenata. S druge strane, kod malih asinhronih motora struja magnećenja može da iznosi i $I_{\mu} = 50\%$ od I_n , dok je kod velikih asinhronih motora ona manja. Snaga magnećenja nalazi se kao proizvod struje magnećenja i napona pri kome se ova struja ima. Efekat magnećenja se u ekvivalentnoj šemi transformatora vidi kroz otočnu granu.

Druga pojava od interesa je efekat rasipanja koji se modeluje u rednoj grani ekvivalentne šeme asinhronog motora. Kod asinhronih motora se govori o rezultatnom rasipanju koje odgovara zbirnoj ekvivalentnoj reaktansi rasipanja statora i rotora. Reaktivna snaga rasipanja, Q_{γ} , nalazi se kao:

$$Q_{\gamma} = X_{\gamma} I^2 \quad (3.19)$$

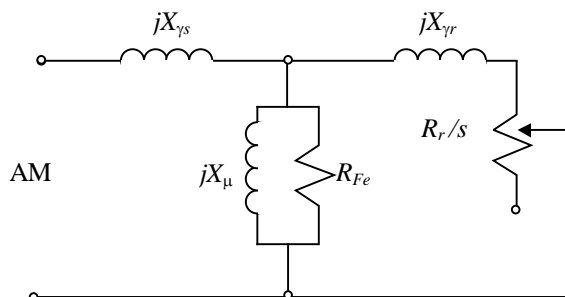
gde je sa I označena odgovarajuća radna struja, a sa $X_{\gamma} = X_{\gamma_s} + X_{\gamma_r}$ označeno je zbirno rasipanje statora i rotora.

Prema tome ukupna reaktivna snaga kategorije II, koju određuje asinhrona potrošnja, sa uprošćenim modelom prikazanim na sl. 3.7, može se prikazati kao zbir reaktivnih snaga magnećenja i rasipanja: $Q_{II} = Q_{\mu} + Q_{\gamma}$. Na sl. 3.7 sa s je obeleženo klizanje asinhronog motora, a sa R_r aktivna otpornost rotorskog kola.

U narednim analizama istovremeno treba da se vodi računa o oba ova fenomena i da se sagledava kada koji dominira.

Ako je veza između napona i struje asinhronog motora linearna, a što je slučaj u režimu praznog hoda kada se radna tačka nalazi na linearnom delu karakteristike magnećenja, sl. 3.9, onda sledi da je impedansa asinhronog motora $Z_{AM} = Z_P$ konstantna, a otuda se direktno zaključuje da je: $k_{QU\mu} = 2$. Tipične vrednosti za $k_{QU\mu}$ su po pravilu od 3 do 4, jer je radna tačka u režimu praznog hoda motora za većinu komercijalnih motora u zoni zasićenja.

Kod analize reaktivnih prilika kod asinhronih motora bitno je razlikovati dve radne zone i to radnu zonu koja odgovara dobrim naponskim prilikama i radnu zonu koja odgovara lošim naponskim prilikama. Dobre naponske prilike su za $U = U_n$ i veće od U_n . Pretpostavlja se da se analizira veoma čest slučaj elektromotornog pogona sa asinhronim motorima sa konstantnim momentom, $M \approx const$. Otuda sledi da je, za približno konstantnu brzinu obrtanja, i snaga praktično konstantna, $P \approx const$. Prema tome, pošto je $P = k_1 UI \approx const$, to sledi da su struje, kod dobrih naponskih prilika, relativno male, čak i kod većih opterećenja (u poređenju sa strujama pri lošim naponskim prilikama). Pošto efekat rasipanja zavisi od kvadrata struje to se zaključuje da kod dobrih naponskih prilika (za pretpostavljeni slučaj) efekat magnećenja dominira nad efektom rasipanja.



Sl. 3.7 Uprošćena ekvivalentna šema asinhronog motora

Za zonu dobrih naponskih prilika je dakle $k_{QU\mu} = 3$, pa čak može da ima i više vrednosti.

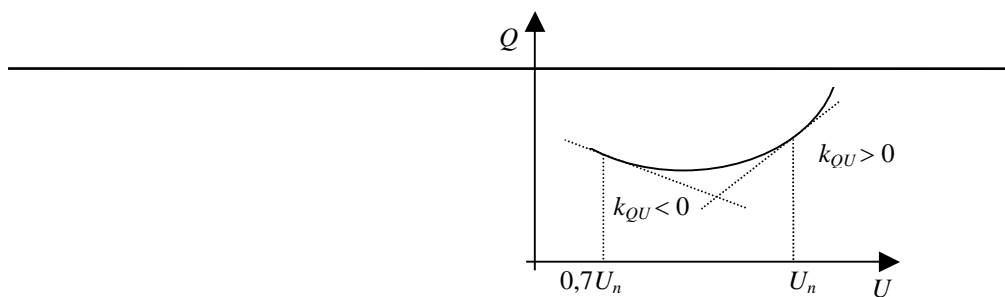
S druge strane, s obzirom da efekat rasipanja ima za posledicu opadanje Q_{γ} sa rastom napona, to onda sledi da je $k_{QU\gamma} < 0$, što onda orijentaciono znači da ukupno magnećenje i rasipanje kod dobrih naponskih prilika daju: $k_{QU\Sigma} \cong 2$.

Dakle, sve se ima kao da je $Z_{AM} = const$ kod dobrih naponskih prilika.

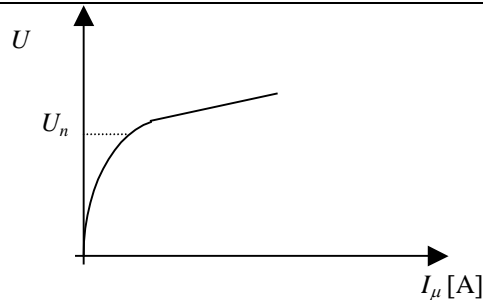
Za zonu loših naponskih prilika je definitivno radna tačka na linearnom delu karakteristike magnećenja, pa sledi da je sa aspekta magnećenja: $k_{QU\mu} \approx 2$.

U uslovima sa lošim naponskim prilikama, a za iste okolnosti približno konstantnog momenta, struje jako rastu pa sledi da efekat rasipanja dominira nad magnećenjem, tj. $k_{QU} < 0$. Ilustracija negativne vrednosti za statički koeficijent reaktivne snage po naponu data je na sl. 3.8.

Prethodna analiza bila je simplificirana da bi se problem mogao pripremiti za detaljnije razmatranje. U suštini statički koeficijenti promene reaktivne snage sa naponom zavise od strukture konzuma (tj. od učešća kategorije asinhrona potrošnje u ukupnoj potrošnji) ali i od snage asinhronih motora, broja obrtaja kao i stepena opterećenja iskazanog u odnosu na nominalno opterećenje. Detaljne analize pokazuju da se pri porastu napona od U_n do $1,05U_n$ (što znači da se napon menja za 5%) u zavisnosti od opterećenja i veličine motora reaktivne snage povećavaju za 7%, kod asinhronih motora sa snagama iznad 100 kW koji su nominalno opterećeni, za 14,5% za motore snaga od 20 do 100 kW, koji su opterećeni sa 75% nominalnog tereta i za čak 21,4% za motore snaga od 4 do 10 kW koji su opterećeni sa 59% nominalnog tereta (ovo znači da je $k_{QU} = 21,4/5 = 4,28$). Dakle, relativne promene su najveće kod neopterećenih, odnosno kod slabo opterećenih motora. Važno je ukazati da se kod realnih situacija za napone do $0,9 U_n$ efekat negativnog k_{QU} praktično ne ispoljava.



Sl. 3.8 Ilustracija pozitivnih i negativnih vrednosti statičkih koeficijenata



Sl. 3.9 Karakteristika magnećenja asinhronog motora

Kao III kategorija prijemnika sa gledišta reaktivne potrošnje analiziraju se po pravilu otočne baterije kondenzatora. Pošto se otočne baterije kondenzatora ponašaju kao izvori reaktivne snage to je statički koeficijent zavisnosti reaktivne snage od napona negativan, odnosno $k_{QU\text{III}} < 0$. S obzirom da se radi o baterijama kondenzatora smatra se da je ukupni kapacitet baterija konstantan, $C = \text{const}$, tj. $Z_P = \text{const}$, pa je vrednost koeficijenta $k_{QU\text{III}} = -2$. Zbog ovih razloga ukupni efekat $k_{QU\Sigma}$ se sa prisustvom otočnih baterija kondenzatora smanjuje na celini konzuma.

Alternativni pristup modelovanju potrošačkog centra u analizi se svodi na polinomijalne zavisnosti umesto eksponencijalnih krivih. Tako se zavisnost aktivne snage od napona može predstaviti polinomom drugog reda:

$$P_P = a_1 U^2 + b_1 U + c_1 \quad (3.20)$$

Ovakav model se skraćeno naziva ZIP model, pošto prvi sabirak odgovara modelovanju dela potrošnje sa konstantnom impedansom (Z), drugi sa konstantnom strujom (I) a treći sa konstantnom snagom (P).

Analogno se za zavisnost reaktivne snage potrošnje od napona može koristiti sledeća polinomijalna zavisnost drugog reda:

$$Q_P = a_2 U^2 + b_2 U + c_2 \quad (3.22.)$$

Koeficijenti (a_1 , b_1 i c_1 kao i a_2 , b_2 i c_2) mogu se odrediti primenom metode minimizacije sume kvadrata odstupanja teorijskih polinoma na osnovu dovoljnog broja eksperimentalno dobijenih tačaka.

Model konstantne snage se uobičajeno koristi u proračunima tokova snaga, model konstantne impedanse se standardno koristio kod fizičkih modela (mrežni analizatori), a model konstantne struje se koristi kod nekih studija stabilnosti.

3.3. Statičke frekventne karakteristike potrošnje

Analogno analizi statičkih naponskih karakteristika kod analize statičkih frekventnih karakteristika uvode se:

k_{Pf} - statički koeficijent promene aktivne snage sa učestanošću,

k_{Qf} - statički koeficijent promene reaktivne snage sa učestanošću.

Važno je ukazati da je u EES-u praktično nedopustivo esperimentisati sa učestanošću, odnosno njenim veštačkim odstupanjima snimati statičke frekventne karakteristike. Razlog je što je učestanost veličina čiji pokazatelji kvaliteta imaju sistemski značaj (a ne lokalni kao kod napona).

Slično analizi koja je sprovedena za promene napona, dobija se u slučaju promena učestanosti sledeće veza:

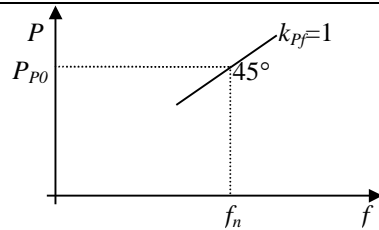
$$k_{Pf} = k_{Pfi} \frac{P_I}{P_P} + k_{PfiI} \frac{P_{II}}{P_P} \quad (3.23)$$

Aktivna snaga termičke potrošnje (P_I), u formuli (3.23.), ne zavisi od učestanosti, dok aktivna snaga motorne potrošnje (P_{II}) zavisi od učestanosti. Za prilike sa $M = \text{const}$, sa rastom učestanosti, raste i brzina obrtnog magnetnog polja, a pošto je klizanje manje više konstantno, to onda raste i brzina obrtanja asinhronog motora, pa tako sa rastom brzine obrtanja i aktivna snaga P_P mora da raste na isti način kao i brzina obrtanja. Iz svega ovoga sledi da je $k_{PfiI} = 1$.

Kod mnogih radnih mašina momenat se menja sa višim stepenima klizanja, tj. stepeni su često 3 i 4. Ako se pretpostavi da se momenat menja sa trećim stepenom klizanja tada je $k_{PfiI} = 3$.

Za mešoviti sastav asinhrono potrošnje dijapazon rezultantnog statičkog koeficijenta zavisnosti promene aktivne snage od učestanosti je: $1 \leq k_{Pf} \leq 3$, a najčešće vrednosti su: 1,5÷2,5.

Reaktivna potrošnja takođe zavisi od učestanosti i tipične vrednosti statičkog koeficijenta promene reaktivne snage sa učestanošću su između -2,0 i 0.



Sl. 3.10 Tipična statička karakteristika promene aktivne snage sa učestanošću

Treba istaći da je smanjena učestanost u sistemu posebno kritična kod velikih termoelektrana sa gledišta njihove sopstvene potrošnje. Naime, veliki asinhroni motori su osnovni potrošači u toj sopstvenoj potrošnji i smanjena učestanost znači i smanjenu radnu sposobnost ovih motora, tako da se kumulativno ima veoma nepovoljan efekat (ispad termoelektane). Prema tome, EES kao tehnološki složena celina, odnosno dispečeri koji vode sistem, moraju strogo da vode računa o kvalitetu učestanosti kako ne bi došlo do lavinskog efekta koji vodi ispadu termoelektrana sa velikom sopstvenom potrošnjom.

Poznavanje statičkih koeficijenata promene aktivne snage sa učestanošću je bitno pri regulaciji aktivnih snaga, jer manje vrednosti učestanosti podrazumevaju i manje zahteve za proizvodnjom aktivnih snaga (sl. 3.10).

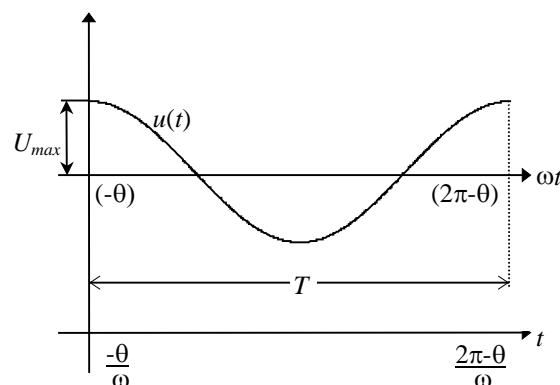
4. Osnovni proračuni u analizi trofaznih elektroenergetskih mreža

U proračunima stacionarnih stanja elektroenergetskih mreža, po pravilu se pretpostavlja da se ima potpuna simetrija u sve tri faze posmatranog naizmjeničnog, trofaznog sistema, pa se iz tih razloga u proračunima može koristiti monofazna šema. Termin *monofazna šema* se u analizi koristi ravnopravno sa terminima *jednopolna* odnosno *jednofazna šema*, baš kao što su i termini *ekvivalentna šema* i *zamenska šema* takođe identični i ravnopravni. Na osnovu monofazne šeme pojedinih elemenata EES-a formira se ekvivalentna (električna) šema mreže adekvatnim povezivanjem ekvivalentnih šema pojedinih elemenata. Ekvivalentna šema mreže pored topologije, tj. međusobnih veza pojedinačnih elemenata, treba da sadrži i informacije o parametrima tih elemenata. U principu je sve proračune moguće realizovati bilo sa apsolutnim, bilo sa relativnim sistemom jedinica. Kod proračuna sa apsolutnim vrednostima sve radne veličine (promenljive) i parametri su izraženi u stvarnim fizičkim jedinicama, dok se kod proračuna sa relativnim sistemom jedinica sve promenljive i parametri izražavaju u relativnim jedinicama, odnosno u tzv. *per unit* (p.u.) sistemu. Osim jediničnih, odnosno p.u. veličina, mogu se koristiti i procentualne veličine.

4.1. Pojam fazora u analizi EES-a

Naponi i struje se u analizi naizmjeničnih prenosnih i distributivnih mreža (naizmjenični prenos) predstavljaju funkcijama kosinusnog ili sinusnog tipa, sl. 4.1. Ako se analizira izraz za vremensku promenu napona, izraz (4.1a), uočava se da postoje tri značajne veličine u tom izrazu: amplituda U_{max} , fazni stav θ i kružna učestanost ω , gde je $\omega = 2\pi f$ (f je frekvencija - učestanost naizmjenične veličine koja u evropskim EES-ima iznosi 50 Hz):

$$u(t) = U_{max} \cos(\omega t + \theta) \quad (4.1a)$$



Sl. 4.1 Vremenska promena napona

Formalno se izraz (4.1a) može prikazati u sledećem obliku:

$$u(t) = \text{Re}[U_{max} \cos(\omega t + \theta) + jU_{max} \sin(\omega t + \theta)] \quad (4.1b)$$

Prethodni izraz korišćenjem Euler-ove formule postaje:

$$u(t) = \text{Re}[U_{max} e^{j(\omega t + \theta)}] = \text{Re}[U_{max} e^{j\theta} e^{j\omega t}] = \sqrt{2} \text{Re}\left[\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} e^{j\theta} e^{j\omega t}\right] \quad (4.1c)$$

Uvažavanjem definicije formule fazora \underline{U} :

$$\underline{U} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} e^{j\theta} \quad (4.1d)$$

konačno se dobija:

$$u(t) = \sqrt{2} \text{Re}[\underline{U} e^{j\omega t}] \quad (4.1e)$$

Suštinska odrednica fazora kao pojma jeste da on sadrži samo dve informacije: informaciju o amplitudi U_{max} (odnosno efektivnoj vrednosti ili modulu, U , kao veličini manjoj $\sqrt{2}$ puta) i informaciju o faznom stavu θ (θ određuje poziciju po

vremenskoj osi). Izgubila se jedna informacija, tj. izgubila se informacija o kružnoj učestanosti ω u odnosu na broj informacija koje sadrži vremenska slika promene. Ako se pretpostavi da se analiziraju stacionarna ili kvazistacionarna stanja kod kojih se učestanost (pa onda i kružna učestanost) ne menja, ili vrlo malo menja, tada se ovo pokazuje opravdanim i zaokružuje dovoljan broj informacija o radnoj veličini. Dakle, primena fazora je korektna za analizu pojava kod kojih je učestanost konstantna. Fazori se mogu formalno prikazivati u polarnom zapisu (kao obrtni vektori, kad ugao θ određuje poziciju vektora u prostoru koja je korespondentna poziciji po vremenskoj osi), izraz (4.2), ili u rektangularnom zapisu izraz (4.3):

$$\underline{U} = Ue^{j\theta} \quad (4.2)$$

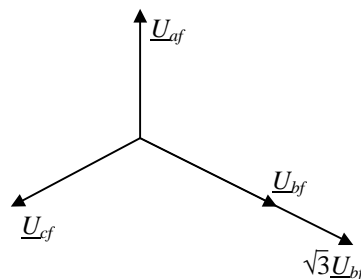
$$\underline{U} = U \cos \theta + jU \sin \theta \quad (4.3)$$

Veza između amplitude, U_{max} , (maksimalne vrednosti) i modula, U , (efektivne vrednosti), za čisto sinusoidalne pojave, data je sa:

$$U = U_{max} / \sqrt{2} \quad (4.4)$$

Efektivna vrednost napona U je upravo ona vrednost koja se čita na standardnim voltmetrima za naizmeničnu struju i iz tog razloga se uobičajeno koristi.

Definicija računskih (međufaznih, linijskih) veličina, odnosno računskih veličina kao fazora, u analizi EES se uvodi tako da se ove veličine predstavljaju fazorima čiji su moduli $\sqrt{3}$ puta veći od odgovarajućih modula fazora faznih veličina, a fazni stavovi su identični faznim stavovima faznih veličina. Ovo je ilustrovano na sl. 4.2, na kojoj su fazori faznih veličina obeleženi sa: \underline{U}_{af} , \underline{U}_{bf} , \underline{U}_{cf} . U monofaznim šemama parametri šema su rezistanse, reaktanse, konduktanse i susceptanse po fazi kao konstante koje garantuju osobinu linearnosti šema. Prema tome naponi i struje u takvim šemama povezani su linearnim relacijama. Ako u šemi deluju računski (umesto faznih) naponi, tada su i posledične struje računске. Proizvodi računskog napona i konjugovane računске struje daju trofazne snage bez $\sqrt{3}$ faktora. Dakle, razlog uvođenja ovakve definicije je elegancija kako formula tako i logike i minimizacija $\sqrt{3}$ faktora u formulama.



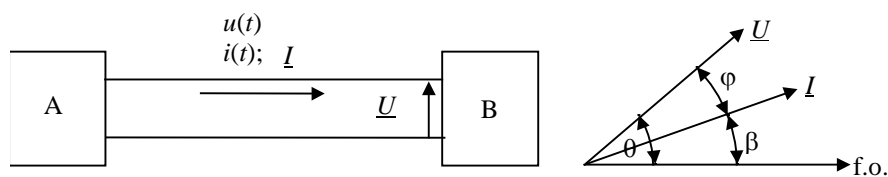
Sl. 4.2 Ilustracija definicije računskih (međufaznih) veličina u analizi EES

4.2. Snaga u sinusoidalnim uslovima

Trenutna vrednost snage u monofaznom kolu pri analizi stacionarnih stanja, za slučaj kada se i napon i struja menjaju po sinusoidalnim zakonima, je:

$$p(t) = ui = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \theta) I\sqrt{2} \cos(\omega t + \beta) \quad (4.5a)$$

U formuli (4.5a) fazni stav struje je obeležen sa β . Pretpostavlja se da je $p(t)$ snaga koja se u monofaznom kolu predaje prijemniku, pri čemu napon i struja imaju usaglašene pozitivne smerove, kao što je to prikazano na sl. 4.3, pri čemu se deo sistema označen sa B može smatrati kao reprezent grupe pasivnih prijemnika. Koristeći sledeći trigonometrijski identitet:



Sl. 4.3 Prenos snage iz dela sistema A u deo sistema B i odgovarajući fazorski dijagram

$$\cos x \cos y = \frac{1}{2} [\cos(x - y) + \cos(x + y)] \quad (4.6)$$

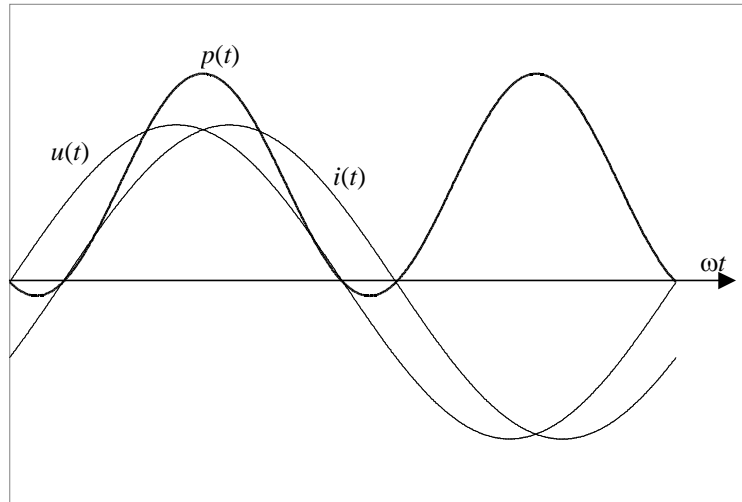
dobija se:

$$p(t) = 2UI \frac{1}{2} [\cos(\omega t + \theta - \omega t - \beta) + \cos(2\omega t + \theta + \beta)], \quad (4.5b)$$

odnosno ima se:

$$p(t) = UI \cos \varphi + UI \cos(2\omega t + \theta + \beta) \quad (4.5c)$$

U izrazu (4.5c) sa $\varphi = \theta - \beta$ je obeležen ugaoni pomeraj između fazora napona i struje čiji $\cos \varphi$ ima veliki značaj u EES-ima i naziva se faktor snage. Vremenska promena napona, struje i snage u stacionarnim sinusoidalnim okolnostima na jednom dijagramu prikazana je na sl. 4.4.



Sl. 4.4 Vremenska promena napona, struje i snage u stacionarnim uslovima

U izrazu (4.5c) prvi sabirak na desnoj strani predstavlja srednju aktivnu snagu (koja nije funkcija ω). Drugi sabirak je funkcija $2\omega t$, pa je srednja vrednost tog drugog sabirka jednaka nuli, odnosno kao rezultat se ima samo srednja snaga P_{sr} . Ovo se jasno prati i na sl. 4.3, gde se vidi da snaga osciluje u monofaznim kolima, odnosno menja se u vremenu. Prema definiciji, srednja snaga se računa kao:

$$P_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = UI \cos \varphi \quad (4.7)$$

Isti izraz za snagu može se dobiti i korišćenjem fazora napona i struje, a što će biti pokazano na primeru *trofaznog kola*. Dakle, trofazna kompleksna snaga, koja je od interesa u analizi trofaznih kola, za poznate fazore računskih (međufaznih, linijskih) napona i struja se nalazi kao:

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = U e^{j\theta} I e^{-j\beta} = UI e^{j\varphi} = S e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ \quad (4.8a)$$

U izrazu (4.8a) snage su trofazne veličine. Interesantno je ovde izračunati i trenutnu vrednost trofazne snage $p_{3f}(t)$:

$$p_{3f}(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) \quad (4.8b)$$

Zamenom se dobija:

$$\begin{aligned} p_{3f}(t) &= U_f \sqrt{2} \cos(\omega t + \theta) I_f \sqrt{2} \cos(\omega t + \beta) + \\ &+ U_f \sqrt{2} \cos(\omega t + \theta - 2\pi/3) I_f \sqrt{2} \cos(\omega t + \beta - 2\pi/3) + \\ &+ U_f \sqrt{2} \cos(\omega t + \theta + 2\pi/3) I_f \sqrt{2} \cos(\omega t + \beta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4.8c)$$

Korišćenjem uvedenog trigonometrijskog identiteta (4.6), dalje se ima:

$$\begin{aligned} p_{3f}(t) &= U_f I_f [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \theta + \beta)] + \\ &+ U_f I_f [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \theta + \beta - 2\pi/3)] + \\ &+ U_f I_f [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \theta + \beta + 2\pi/3)] = \\ &= 3UI \cos \varphi = 3P_f = UI \cos \varphi \end{aligned} \quad (4.8d)$$

Analizom poslednjeg izraza uočava se da trofazna snaga nema pulsirajući karakter pošto se tri sabirka, koji se sa vremenom menjaju sa dvostrukom učestanoću $2\omega t$, međusobno poništavaju. Identičan zaključak se lako potvrđuje i korišćenjem fazorske reprezentacije. Činjenica da je trenutna vrednost trofazne snage koja se predaje prijemniku konstantna značajna je prednost trofaznih sistema u odnosu na monofazne, kod kojih trenutna snaga ima pulsirajući karakter (srednja snaga je i kod monofaznih sistema konstantna). Ako je prijemnik trofazni asinhroni motor onda će i momenat i brzina obrtanja biti konstantni, što je preduslov mirnog rada motora.

Posebno značajna prednost trofaznih sistema je ekonomičnost koja se najlakše ilustruje kroz poređenje monofaznog (dvožičnog) voda i trofaznog simetričnog voda bez neutralnog provodnika (koji nije ni potreban u slučaju perfektno simetrije). U takvim okolnostima za iste preseke faznih provodnika utrošak provodnog materijala je za 50% veći za slučaj trofazne konstrukcije (3 provodnika prema 2 provodnika). Međutim, snaga koja se prenosi trofaznim vodom je trostruko veća, za iste napone i struje, tako da je ekonomičnost trofazne varijante dvostruko veća od monofazne (naime, preneti snaga se svede na broj provodnika i takav relativni pokazatelj je merodavan za poređenje).

Radi dalje ilustracije značaja faktora snage u analizi naizmjeničnih EES-a na sl. 4.3 (koja je već prethodno pomenuta) je prikazan prenos snage od mreže A ka mreži B. Prema takvoj notaciji snaga u relaciji (4.7) predstavlja srednju snagu koju mreža A predaje mreži B. Naravno, ugao φ je (sl. 4.4) ugao za koji struja kasni za naponom (ovo podrazumeva induktivni karakter mreže B).

Uočava se da je P , prema formuli (4.7), upravo isto što i P_{sr} i ta veličina se uobičajeno naziva aktivnom snagom. Znak aktivne snage P je pozitivan za I i IV kvadrant (znak $\cos \varphi$), i tada se aktivna snaga predaje od A ka B. S druge strane P je negativno za II i III kvadrant (prenos aktivne snage od B ka A). Saglasno uobičajenoj notaciji sa Q je označena reaktivna snaga (za slučaj kad se konjuguje struja reč je o reaktivnoj induktivnoj snazi) i ona je pozitivna u I i II kvadrantu (znak $\sin \varphi$). Tada se reaktivna snaga prenosi od A ka B. Reaktivna snaga Q je negativna u III i IV kvadrantu, odnosno u takvim okolnostima se reaktivna snaga prenosi od B ka A.

Poseban slučaj se ima kad je mreža B čisto pasivna. Tada se ona može modelovati nekom impedansom \underline{Z} :

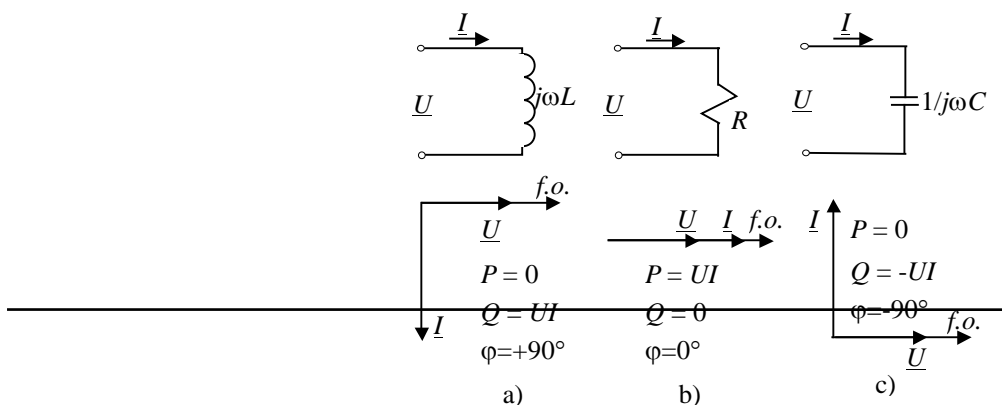
$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\theta-\beta)} = \frac{U}{I} e^{j\varphi} \quad (4.8)$$

Odnosno ima se:

$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi} \quad (4.9)$$

Uočava se da je φ za ovako definisanu pasivnu mrežu istovremeno i ugao impedanse.

Ova impedansa se može shvatiti i kao reprezent, odnosno model nekog potrošačkog područja. Karakteristične granične situacije su da impedansa bude ili čista induktivnost, čista aktivna otpornost ili čista kapacitivnost. Ovo je ilustrovano na sl. 4.5 zajedno sa preciznim određenjem ugla impedanse i njegovog znaka. Definicijom ugla φ prema (4.8) se inženjerski logično, praćenjem njegovog znaka, prate reaktivne snage. Naime, za slučaj da se ima kapacitivna struja, tada sledi da je ugao φ negativan i onda je i reaktivna (induktivna) snaga negativna, odnosno ima se slučaj generisanja reaktivne snage (ponašanje karakteristično za baterije kondenzatora).



Sl. 4.5 Granične predstave pasivne mreže (potrošnje)

4.3. Metod jediničnih vrednosti (per unit metod)

Metod jediničnih vrednosti (p.u. metod) se pokazuje veoma pogodnim za mnoge proračune u EES-ima. Bilo koja jedinična veličina u p.u. sistemu se definiše kao:

$$\text{jedinična veličina} = \frac{\text{stvarna veličina}}{\text{bazna veličina}}$$

Fizičke veličine u jediničnom sistemu su bez dimenzija. Osnovne jednačine moraju po formi da ostanu neizmenjene. Posledica ovog zahteva je da bazne veličine moraju biti realni brojevi. Ako se stvarne veličine - fazori (brojitelji), podele sa baznim veličinama - realnim brojevima (imenitelji), dobijaju se kao rezultat fazori u jediničnom sistemu. Dakle, da bi se proračun izvodio u p.u. sistemu, potrebno je izabrati bazne vrednosti na koje će se svoditi sve stvarne veličine od interesa.

Razloga za uvođenje p.u. sistema ima više i oni se mogu prikazati kroz sledeće poente:

1) Postojanje transformatora u EES-u. Jedinični sistem je moguće tako uvesti da eliminiše idealne transformatore iz ekvivalentnih šema (tj. prelaskom na jednopolne šeme gubi se potreba za formalnim prisustvom transformatora).

2) U jediničnom sistemu radne veličine, pre svega naponi, ali i snage i struje, ulaze u jedan uži dijapazon nego što je to slučaj u apsolutnom sistemu. Za primer je zgodno pokazati da radni napon u jediničnom sistemu koji je jednak $U_r = 1,03$ p.u., znači 3% veći napon od nominalnog na svim naponskim nivoima. Ako se taj isti napon za mrežu 220 kV iskaže kao apsolutna veličina, odnosno kao 226,6 kV, tada je mnogo teže osetiti direktno o kom se radnom naponu radi u jediničnim koordinatama.

3) U jediničnom sistemu parametri elemenata sistema takođe pripadaju vrlo uskom dijapazonu vrednosti koje imaju punu inženjersku upotrebnu vrednost. Tako npr. prirodna reaktansa rasipanja energetskih transformatora na naponskim nivoima 110 kV ili 220 kV tipično iznosi oko 12%, odnosno $x_T\% = 12\%$. Naravno, veza p.u. sistema i procentualnog sistema je ovde direktna: $x_T\% = x_T(p.u.) \cdot 100$. Ova ista vrednost iskazana u Ω za transformator snage $S_{nT} = 150$ MVA i prenosnog odnosa $m_T = 220/110$ kV/kV

$$\text{iznosi: } x_T(\Omega) = 0,12 \cdot \frac{220^2}{150} = 38,72 \Omega.$$

Kad se ova vrednost svede na stranu

110 kV dobija se 9,68 Ω . Dakle, očigledno je da kad se x_T iskaže u Ω tada ono ima veoma raznorodne vrednosti za razne snage na raznim naponskim nivoima. Taj isti parametar, iskazan u p.u. sistemu, pada u veoma uski opseg vrednosti. Treba ukazati da se u analizi prenosni odnos transformatora može skraćeno obeležavati sa 220/110 kV (drugi način), a ne samo kako je prethodno urađeno sa 220/110 kV/kV (prvi način). Prvi način je formalno korektan jer je m_T neimenovan broj, ali je i drugi način uobičajen, pošto u inženjerskoj praksi ovo teško može da proizvede konfuziju, a grafički se ima kraći zapis.

4) Pošto se moduli napona, kao tipične radne veličine nalaze oko vrednosti 1 p.u., ta se činjenica pokazuje posebno pogodnom za računarske aplikacije. Prikaz rezultata, bilo grafički, bilo tabelarno je vrlo pregledan i podesan za poređenja i za analize.

5) Sa gledišta složenih numeričkih proračuna p.u. sistem ima bolju uslovljenost jednačina, tj. postoji bolja numerička stabilnost.

Uvođenje jediničnog sistema unosi i određene slabosti od kojih je važno ukazati na sledeće:

1) Jedinični sistem je definitivno još jedna dodatna apstrakcija.

2) Ugaoni pomeraji, tj. fazni pomeraji između fazora napona na pojedinim sabirnicama (koje su povezane sa transformatorima različitih sprega) ponekad mogu nestati u jediničnom sistemu jedinica, dok su u apsolutnom sistemu jedinica oni bili jasno određeni.

Prema tome jedinični sistem je sa gledišta inženjerske prakse jednostavniji, numerički opravdaniji ali je u pojmovnom smislu složeniji. Procentualne vrednosti predstavljaju relativne vrednosti pomnožene sa 100 i iz jediničnog sistema se lako prelazi u procentualni sistem. Kod takvih proračuna uz impedanse se može javiti paraziti koeficijent (10^4) što je jedan od razloga zbog čega se ovo ređe koristi. Obično se radne veličine ne prevode u procentualni sistem. Međutim, generalno se sa procentualnim sistemom proračuni uglavnom ne rade jer se neke procentualne vrednosti dobijaju posle određenih matematičkih operacija kao vrlo neprirodne, tako da interpretacija rezultata postaje mnogo složenija.

Za proračune u jediničnom sistemu dovoljno je izabrati baznu snagu koja je zajednička za sve delove mreže (obično neka karakteristična vrednost, ili neka vrednost bliska stvarnim snagama u sistemu) i bazni napon. Bazni naponi ostalih mreža, povezani sa ovom usvojenom baznom vrednošću, se moraju preračunati preko ove usvojene vrednosti za jednu mrežu i preko stvarnih odnosa transformacije, koji ostale mreže (ili delove mreža), povezuje sa ovom. U principu se ima onoliko baznih napona koliko ima naponskih nivoa u mreži.

Ako se pođe od definicione relacije za kompleksnu snagu, formula (4.8a):

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^*,$$

i ako se saglasno već uvedenoj fazorskoj notaciji uzme da je:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= S e^{j\varphi} \\ \underline{U} &= U e^{j\theta} \\ \underline{I} &= I e^{j\beta}, \end{aligned}$$

tada se u stvarnom sistemu jedinica dobija:

$$S e^{j\varphi} = U I e^{j(\theta-\beta)}.$$

Za baznu snagu se uzima:

$$S_b = U_b I_b$$

pri čemu su i bazna snaga i snaga u apsolutnom sistemu jedinica iskazane u VA, kVA ili MVA. Sada se u jediničnom sistemu ima:

$$\begin{aligned}\frac{S e^{j\varphi}}{S_b} &= \frac{UI e^{j(\theta-\beta)}}{S_b} = \frac{UI e^{j(\theta-\beta)}}{U_b I_b} \\ S_{p.u.} e^{j\varphi} &= U_{p.u.} e^{j\theta} I_{p.u.} e^{-j\beta} \\ \underline{S}_{p.u.} &= \underline{U}_{p.u.} \underline{I}_{p.u.}^*\end{aligned}\quad (4.10)$$

Tipična situacija u EES-u je da se za bazne vrednosti uzimaju: prividna snaga S_b i računski (međufazni ili linijski) napon U_b . Sve ostale fizičke veličine koje figurišu u proračunima, tj. baze ostalih veličina: I_b , Z_b i Y_b određene su sa ove dve baze, pa se i zovu izvedene baze.

Bazna struja, koja je posledica uvođenja S_b i U_b , mora se pažljivo primenjivati u zavisnosti da li je prijemnik koji se analizira vezan u zvezdu ili u trougao. Prethodno definisana struja je računska struja tj. $I_b = \sqrt{3} I_{bf}$.

Dobra strana p.u. sistema je da forma jednačina ostaje nepromenjena u odnosu na stvarni sistem jedinica. Tako je iskaz Ohm-ovog zakona identičan i u stvarnom i u p.u. sistemu:

$$\underline{Z} = \frac{U}{I} \Rightarrow \underline{Z}_{p.u.} = \frac{U_{p.u.}}{I_{p.u.}} \quad (4.11)$$

Isto važi i za ostale fizičke zakonitosti. Tako se za impedansu u jediničnom sistemu ima:

$$\underline{Z}_{p.u.} = \frac{\underline{Z}}{Z_b} = \frac{R + jX}{Z_b} = \frac{R}{Z_b} + j \frac{X}{Z_b} = R_{p.u.} + jX_{p.u.} \quad (4.12)$$

U literaturi se može sresti da se kao bazne veličine uvode fazne struje i trofazne snage, pa to za posledicu ima postojanje parazitnih koeficijenata $\sqrt{3}$. Naime, treba imati u vidu da je u inženjerskim proračunima logično da je bazna struja u vezi sa nominalnom strujom elementa, odnosno sa njegovom trajno dopuštenom termičkom strujom, koja je po prirodi stvari fazna veličina kod nadzemnih vodova. Tako bi kod ovakvog prilaza jedinična vrednost struje od 0,7 predstavljala baš 70% od granično dozvoljene trajne struje. Iz ovih razloga, a zbog izbegavanja konfuzije kod početnika, potrebno je u proračunima precizirati o kojoj baznoj struji je reč.

Mogući su i neki drugi izbori p.u. sistema, tako da ne postoji jedinstven pristup problematici jediničnih sistema. Na kraju proračuna, a sa gledišta procene vrednosti stvarnih veličina uvek je važno preći iz p.u. u apsolutni sistem jedinica. Kod kompletnog uvođenja jediničnog sistema potrebno je i uvođenje bazne učestanosti f_b koja je neophodna kod analize elektromehaničkih prelaznih procesa, tj. kod analize stabilnosti EES-a. Prema tome, kompletan sistem baznih veličina je: S_b , U_b , f_b .

Za bazne snage tipične vrednosti su: 1; 10; 50; 100; 1000 MVA. Obično se snaga od 100 MVA koristi kao bazna za naponski nivo od 220 kV pošto je prirodna snaga bliska toj vrednosti:

$$P_{nat} = \frac{U^2}{Z_c} = \frac{220^2}{400} \approx 120 \text{ MVA}$$

U gornjem izrazu sa Z_c je označena karakteristična impedansa koja za 220 kV vodove (konstrukcija sa jednim provodnikom po fazi) iznosi oko 400 Ω .

Inženjerski je logično da se kao praktično pravilo pri uvođenju baznih snaga uzme orijentacija prema prirodnim snagama pojedinih vodova na određenim naponskim nivoima.

Glavna prednost korišćenja jediničnog sistema u analizi EES ispoljava se onda kada sistem sadrži više transformatora. Proračuni sa impedansama u apsolutnom sistemu zahtevali bi svođenja impedansi na različite naponske nivoe (korišćenjem kvadrata prenosnih odnosa), sve dok svaka pojedinačna impedansa ne bi bila svedena na zajednički naponski nivo. Za izračunavanje struja na različitim naponskim nivoima mora se naknadno vršiti preračunavanje sa recipročnim vrednostima prenosnih odnosa. U jediničnom sistemu, vrednosti impedansi su iste na obema stranama dvonamotajnih transformatora, pod uslovom da su bazne vrednosti pravilno odabrane, u skladu sa preslikavanjem kroz transformator. Bazna vrednost napona na sekundarnoj strani jednaka je baznoj vrednosti napona na primarnoj strani pomnoženoj sa prenosnim odnosom transformatora. Slično je i za impedanse bilo kojih elemenata u sistemu koje se jednostavno mogu inkorporirati u impedanse primara i sekundara transformatora (produženi primar, odnosno sekundar). Naravno, bazna vrednost za snage je ista na obe strane dvonamotajnog transformatora. U ovakvim okolnostima transformator se može posmatrati kao neka redna impedansa u kolu a svođenja napona i struja jednostavno nisu tada od interesa. Naravno, konačno preračunavanje u apsolutni sistem jedinica je neophodno za završna, realna fizička sagledavanja.

4.4. Proračuni pada napona

Kvalitet isporučene energije usko je vezan za kvalitet napona i učestanosti. Napon je fizička veličina sa lokalnim karakteristikama, dok se kvalitet učestanosti globalno rešava na sistemskom nivou. Analiza kvaliteta učestanosti je van domena ovoga kursa. Jedan od pokazatelja kvaliteta napona je pad napona, uobičajen inženjerski termin koji označava razliku modula napona u posmatranoj tački (radna vrednost napona obeležena je sa U u narednim relacijama), prema nekoj referentnoj vrednosti (najčešće nominalnom naponu). Pad napona se može interpretirati kao apsolutni pad napona (brojitelj u relaciji (4.13)), kao relativna vrednost pada napona, relacija (4.13), ili kao procentualna vrednost pada napona, relacija (4.14):

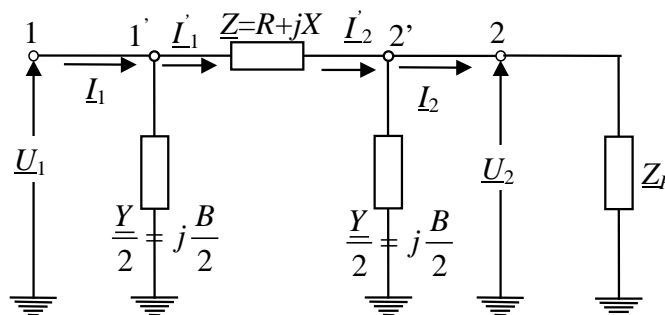
$$\Delta U = \frac{U - U_n}{U_n} \tag{4.13}$$

$$\Delta U(\%) = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100 \tag{4.14}$$

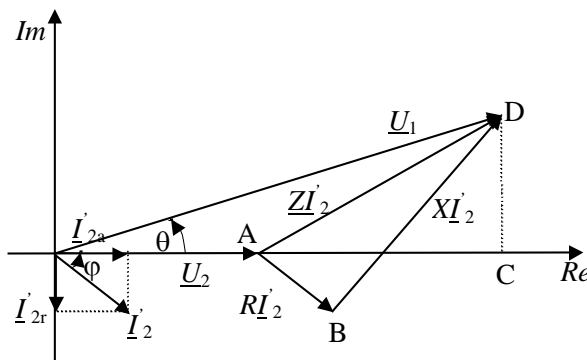
Dakle, relacija (4.13) predstavlja relativni pad (odstupanje) napona, pošto je u brojitelju dat apsolutni pad napona, dok je u relaciji (4.14) predstavljen procentualni pad napona.

Proračun pada napona na vodu pogodno je prikazati na ekvivalentnoj π -šemi voda, na čijem je prijemnom kraju vezana neka potrošnja, modelovana impedansom Z_p . U otočnoj grani se, po pravilu, zanemaruje konduktansa G čija je priroda uslovljena pojavom korone i strujama odvoda koje teku po površini izolatora usled nesavršenosti izolacije. Ova šema prikazana je na sl. 4.6, na kojoj je:

- 1- predajni kraj
- 2- prijemni kraj voda, odnosno nekog drugog elementa u EES-u modelovanog π -šemom.



Sl. 4.6 Ekvivalentna π -šema voda sa zanemarenom konduktansom



Sl. 4.7 Fazorski dijagram napona na π -zamenskoj šemi voda

Na sl. 4.7 prikazan je fazorski dijagram napona koji predstavlja preciznu sliku naponskih prilika na ekvivalentnoj šemi. Na ovom dijagramu oznake imaju sledeće značenje:

\overline{AC} - podužna komponenta pada napona, ΔU_2 (projekcija \overline{AD} na Re osu).

\overline{CD} - poprečna komponenta pada napona, δU_2 (projekcija \overline{AD} na Im osu).

Osnovne relacije za šemu na sl. 4.7 se pišu prema Kirchoff-ovim pravilima:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{Z} \cdot \underline{I}'_2 \tag{4.15}$$

$$\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 + \underline{U}_2 \cdot (\underline{Y}/2) = \underline{I}'_1 \tag{4.16}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}'_1 + \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}/2 \tag{4.17}$$

U izrazu (4.15) figuriše vektorska (fazorska) razlika napona koja se u inženjerskim primenama praktično ne koristi. Ako se fazor napona \underline{U}_2 postavi u faznu osu, tj. $\underline{U}_2 = U_2 \angle 0$ i ako se struja \underline{I}'_2 (koja je induktivnog karaktera i teče kroz impedansu \underline{Z}) rastavi na aktivnu i reaktivnu komponentu:

$$\underline{I}'_2 = I'_{2a} - jI'_{2r} = I'_2 \cos \varphi - jI'_2 \sin \varphi \quad (4.18)$$

tada se dobija:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= U_2 + (R + jX)(I'_2 \cos \varphi - jI'_2 \sin \varphi) = \\ &= U_2 + (RI'_2 \cos \varphi + XI'_2 \sin \varphi) + j(XI'_2 \cos \varphi - RI'_2 \sin \varphi) \\ &= U_2 + \Delta U_2 + j\delta U_2 \end{aligned} \quad (4.19)$$

U prethodnom izrazu vektorska razlika napona predstavljena je sa svoje dve komponente, onom u fazi sa fazorom napona \underline{U}_2 (podužnom komponentom pada napona) i onom ortogonalnom na fazor napona \underline{U}_2 (poprečnom komponentom pada napona). Pošto se fazor napona na početku voda može prikazati preko modula i argumenta:

$$\underline{U}_1 = U_1 e^{j\theta} \quad (4.20)$$

to se onda modul napona U_1 može pisati kao:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_2)^2 + (\delta U_2)^2} \quad (4.21)$$

Ovakav način predstavljanja vektorske razlike napona je uobičajen u praksi pošto poprečna komponenta pada napona, u većini praktičnih primera, veoma malo utiče na ukupnu skalarnu promenu napona, zato jer je ortogonalna u odnosu na fazor napona \underline{U}_2 i zato jer su ugaoni pomeraji između fazora napona relativno mali uglovi.

Prethodne relacije moguće je izvesti i preko snaga, koje su invarijantne u odnosu na koordinatni sistem i veoma pogodne u analizi trofaznih elektroenergetskih mreža. Na sl. 4.6 treba razlikovati veličine obeležene sa *prim* od onih bez takve oznake, pošto se ove druge razlikuju za deo snage (struje) koji uzima ili daje otočna grana. U konkretnoj analizi aktivne snage se ne razlikuju pošto otočna grana sadrži samo susceptansu.

U narednim relacijama koriste se trofazne snage, računski naponi i odgovarajuće računске struje. Prema definiciji kompleksne snage, a vodeći računa o faznim stavovima fazora napona i struje (uz zadržan induktivni karakter struje), ima se:

$$\begin{aligned} \underline{S}'_2 &= \underline{U}_2 \underline{I}'_2{}^* = U_2 e^{j\theta} I'_2 e^{-j\varphi} = U_2 I'_2 e^{j\varphi} \\ \underline{S}'_2 &= S'_2 e^{j\varphi} = S'_2 \cos \varphi + jS'_2 \sin \varphi = P'_2 + jQ'_2 \end{aligned} \quad (4.22)$$

Imajući u vidu prethodne izraze, relacija koja povezuje fazore napona je sledećeg oblika:

$$\underline{U}_1 = U_2 + \underline{Z} \underline{I}'_2 = U_2 + \underline{Z} \frac{\underline{S}'_2{}^*}{U_2} = U_2 + (R + jX) \frac{P'_2 - jQ'_2}{U_2} \quad (4.23)$$

U relaciji (4.23) za izračunavanje kompleksnog pada napona iskorišćena je konjugovana vrednost kompleksne snage, tako da se konačni izrazi mogu prikazati na sledeći način:

$$\underline{U}_1 = U_2 + \frac{P'_2 R + Q'_2 X}{U_2} + j \frac{P'_2 X - Q'_2 R}{U_2} = U_2 + \Delta U_2 + j\delta U_2 \quad (4.24)$$

U relaciji (4.24) se podrazumeva da su zadate veličine (snage i napon) na kraju 2 a da je zadatak izračunavanje veličina na kraju 1. Međutim, ako se poznaju veličine na kraju 1 (snage i napon) tada se fazor napona \underline{U}_2 računa preko tih veličina prema sledećoj formuli:

$$\underline{U}_2 = U_1 - \frac{P'_1 R + Q'_1 X}{U_1} - j \frac{P'_1 X - Q'_1 R}{U_1} \quad (4.25)$$

U relaciji (4.24) podužna i poprečna komponenta pada napona su određene preko snaga i u takvom obliku se ovi izrazi u praksi najviše upotrebljavaju. U relaciji (4.25) načinjena je pretpostavka da je fazor napona \underline{U}_1 po faznoj osi, tako da se o ovome mora voditi računa kod primene ove formule.

Ako se ima u vidu formalna definicija fazora računskih (linijskih, međufaznih) veličina u analizi EES-a, prema kojoj su ovi fazori istog faznog stava kao i odgovarajući fazori faznih veličina a moduli su im $\sqrt{3}$ puta veći, tada analogni izrazi važe i za fazne napone, struje i snage. Naime, prelaskom relacije (4.24) na fazne veličine ima se:

$$\sqrt{3}\underline{U}_{1f} = \sqrt{3}\underline{U}_{2f} + \frac{3P'_{2f}R + 3Q'_{2f}X}{\sqrt{3}U_{2f}} + j \frac{3P'_{2f}X - 3Q'_{2f}R}{\sqrt{3}U_{2f}} \quad (4.26)$$

U izrazu (4.26) R i X su po prirodi stvari veličine po fazi.

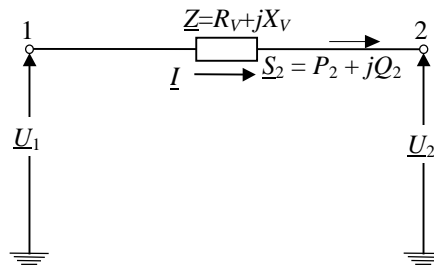
Iz relacije (4.24) izraz za podužnu komponentu u opštem slučaju, kad se zanemare razlike između snaga obeleženih sa i bez "prim" postaje:

$$\Delta U_2 = \frac{P_2R + Q_2X}{U_2} \Rightarrow \Delta U_2\% = \frac{P_2R + Q_2X}{U_2^2} \cdot 100 \quad (4.27)$$

Procentualna vrednost podužne komponente pada napona iskazana je preko poređenja sa modulom napona na kraju voda. Podužna komponenta je po pravilu bitno uticajnija na ukupni pad napona od poprečne komponente zbog realnih odnosa parametara i radnih veličina u prenosnim, a posebno u distributivnim mrežama.

Moguće je zadatak postaviti i u formi hibridnog problema kad se poznaju snage na kraju 2 i napon na kraju 1, ili obrnuto. Nalaženje radnog stanja u mreži je u tom slučaju nešto složenije.

Kod postavke hibridnog zadatka pretpostavlja se da je poznat napon na predajnom kraju voda 1 ($\underline{U}_1 = U_1 e^{j0}$) i snaga na kraju 2 ($\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$). Zadatak se svodi na izračunavanje napona \underline{U}_2 . Ilustracija zadatka je data na sl. 4.8:



Sl. 4.8 Ekvivalentna šema za ilustraciju hibridnog zadatka

Kod rešavanja ovog zadatka polazi se od sledeće veze na kraju 2:

$$\underline{S}_2 = \underline{U}_2 \underline{I}^* = P_2 + jQ_2 \quad (4.28)$$

odakle se nalazi:

$$\underline{I} = \frac{P_2 - jQ_2}{\underline{U}_2^*} \quad (4.29)$$

S druge strane ima se:

$$\underline{U}_1 = (R + jX)\underline{I} + \underline{U}_2 \quad (4.30)$$

Zamenom (4.29) u (4.30) dobija se:

$$\underline{U}_1 = \frac{(R + jX)(P_2 - jQ_2)}{\underline{U}_2^*} + \underline{U}_2 \quad (4.31)$$

Ako se sada \underline{U}_2 predstavi preko svog realnog i imaginarnog dela:

$$\underline{U}_2 = e_2 - jf_2, \quad (4.32)$$

i fazor napona na kraju 1 postavi po faznoj osi, $\underline{U}_1 = U_1 e^{j0}$, to sledi:

$$U_1(e_2 + jf_2) = (R + jX)(P_2 - jQ_2) + U_2^2 \quad (4.33)$$

Izjednačavanjem realnih i imaginarnih delova u (4.33) nalazi se:

$$U_1 e_2 = P_2 R + Q_2 X + e_2^2 + f_2^2 \quad (4.34)$$

$$U_1 f_2 = P_2 X - Q_2 R \quad (4.35)$$

Iz (4.35) se direktno izračunava imaginarni deo:

$$f_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_1} \quad (4.36)$$

Realni deo se izračunava rešavanjem kvadratne jednačine koja se dobije kada se (4.36) smeni u (4.34):

$$e_2^2 - U_1 e_2 + f_2^2 + P_2 R + Q_2 X = 0 \quad (4.37)$$

Rešenja kvadratne jednačine (4.37) su:

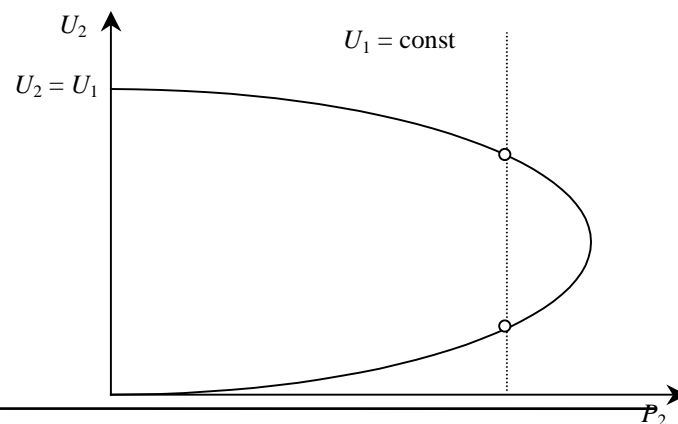
$$e_{2(1,2)} = \frac{U_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{U_1}{2}\right)^2 - \frac{(P_2 X - Q_2 R)^2}{U_1^2} - (P_2 R + Q_2 X)} \quad (4.38)$$

Postavljeni zadatak nije jednoznačno rešiv zato što realna komponenta napona na kraju 2 ima dve vrednosti, za samo jedan par vrednosti (P_2 , Q_2), odnosno za jednu vrednost prividne snage na kraju 2. U konkretnim zadacima odabire se samo ono rešenje koje ima fizičkog smisla.

U cilju pojednostavljenja analize karakterističnih situacija interesantno je postaviti pitanje kolika se najveća snaga P_2 može isporučiti potrošnji ako je $Q_2 = 0$ i $R = 0$. Za napon U_2 se tada dobija sledeći izraz:

$$\underline{U}_2 = \frac{U_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{U_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{P_2 X}{U_1}\right)^2} - j \frac{P_2 X}{U_1} \quad (4.39)$$

Zavisnost $U_2 = f(P_2)$ je ilustrovana na sl. 4.9, sa pretpostavljenim modulom napona na kraju 1 konstantnim, $U_1 = const$.



Sl. 4.9 Zavisnost napona na prijemnom kraju od aktivne snage na tom kraju pri $U_1 = const$

Pošto realni deo napona u izrazu (4.39) ne sme da sadrži imaginarnu komponentu, to sledi da potkorena veličina mora da bude pozitivna:

$$\sqrt{\left(\frac{U_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{P_2 X}{U_1}\right)^2} \geq 0 \quad (4.40)$$

Na osnovu izraza (4.40) zaključuje se da je maksimalna snaga koja se može predati potrošačkom području na kraju 2 pod pretpostavljenim uslovima:

$$P_2^{max} = \frac{U_1^2}{2X} \quad (4.41a)$$

Ako se analiza sprovede za $Q_2 = 0$ i $X = 0$ dobiće se da je maksimalna snaga:

$$P_2^{max} = \frac{U_1^2}{4R} \quad (4.41b)$$

Zaključak je da se aktivna snaga dvostruko lakše prenosi kroz reaktanse voda, nego kroz njegove aktivne otpornosti. Za reaktivne snage se ima suprotan zaključak. Imajući u vidu da na nadzemnim vodovima dominiraju reaktanse to sledi da se aktivna snaga kroz njih osetno lakše prenosi od reaktivne.

Ovde je interesantno ukazati na još jednu mogućnost predstavljanja naponskih prilika na vodovima. Naime, ako se pretpostavi da je referentna vrednost napona modul napona na kraju 2 pri punom (maksimalnom) opterećenju voda obeležen sa U_2^{min} (to je prirodno minimalan napon pošto je teret na vodu tada najveći), i da je napon pri praznom hodu voda U_2^{max} tada se može uvesti pojam regulacionog opsega napona na vodu, koji iskazan u procentima iznosi:

$$\Delta U_{reg} \% = \frac{U_2^{max} - U_2^{min}}{U_2^{min}} \cdot 100 \quad (4.42)$$

Ako se napon na prijemnom kraju nadzemnog prenosnog voda tipično održava unutar granica $\pm 5\%$ (u odnosu na nazivni napon) tada se kaže da regulaciji napona odgovara dijapazon od 10% .

Poprečna komponenta pada napona se, šta više, često može i zanemariti. Naime, ako se prema relaciji (4.24) izvrši analiza opšte formule za poprečnu komponentu:

$$\delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \quad (4.43)$$

tada se uočava da je razlika koja figuriše u brojiocu od presudnog značaja za njen iznos (oznaka "prim" je ponovo ispuštena s tim što u konkretnom slučaju važi da je $P_2' = P_2$ i $Q_2' \neq Q_2$). Procentualna vrednost poprečne komponente pada napona je:

$$\frac{\delta U_2}{U_2} \% = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2^2} \cdot 100 \quad (4.44)$$

Iz (4.43) se vidi da je brojilac blizak nuli ako su proizvodi tipa PX i QR bliski po vrednosti. Parametri R i X su tipično veoma bliski kod 35 kV nadzemnih vodova (podužne vrednosti aktivne otpornosti i reaktanse su negde oko $0,36 \Omega/\text{km}$) i ako se takvim dalekovodom prenosi aktivna snaga bliska reaktivnoj (tada je faktor snage jako nepovoljan i iznosi 0.707), tada se stiču uslovi da je poprečna komponenta zaista bliska nuli. Ostale praktične situacije su nešto drugačije. U tipičnim prenosnim mrežama P treba da dominira nad Q (ili su P i Q u najnepovoljnijim okolnostima istog reda veličine), pa pošto X dominira nad R , to u prenosnim mrežama sabirak $P_2 X$ dominira nad $Q_2 R$ ($P_2 X \gg Q_2 R$). Iz tih razloga poprečnu komponentu treba proveriti u ovim mrežama. S druge strane ugaoni pomeraj napona, odnosno njegov tangens, se može u ovim mrežama proceniti jednostavno preko uprošćene formule:

$$\text{tg}\theta \approx \frac{P_2 X}{U_2} / U_2 = \frac{P_2 X}{U_2^2} \quad (4.45)$$

i pošto se radi o malim uglovima umesto $\text{tg}\theta$ može se procenjivati odmah vrednost ugla u stepenima. Naravno, za vrlo duge dalekovode ovo nije validno i kod njih se mora izvršiti egzaktni proračun da bi se našao korektan ugaoni pomeraj između fazora napona.

U distributivnim (sredjenaponskim i niskonaponskim) mrežama P treba da dominira nad Q , pa pošto R postaje veće od X , počev od 10 kV pa na niže, proizvodi PX i QR postaju opet bliski, i zato se poprečna komponenta u ovim mrežama sa pravom zanemaruje.

Relacija (4.45) može korisno poslužiti i za uočavanje jedne šire zakonomernosti u EES-ima. Naime, vidi se da je ugaoni pomeraj sa aspekta radnih veličina uglavnom uslovljen aktivnim snagama tako da se zaključuje da su uglovi i aktivne snage međusobno spregnuti u velikoj meri, dok se na drugoj strani imaju spregnuti moduli napona i reaktivne snage. Prvi par radnih veličina čini prvu regulacionu konturu $\{P, \theta\}$ i pokazuje se da je ona gotovo nezavisna od druge regulacione konture $\{Q, U\}$.

Interesantno je ukazati na odnose parametara R i X u mrežama viših napona:

$R:X \approx 1:2$ za 110 kV

$R:X \approx 1:4$ za 220 kV

$R:X \approx 1:11$ za 400 kV.

U prenosnim mrežama (npr. za mrežu 400 kV) je tipično $P > Q$, pa npr. za $P = 2Q$ ($\cos\varphi = 0,894$), zbog odnosa $R:X = 1:11$, u izrazu za podužnu komponentu ΔU_2 , dominira drugi sabirak Q_2X nad P_2R oko 5 puta, odnosno približno se ima:

$$\Delta U_{2rel} \approx \frac{Q_2 X}{U_2^2} \quad (4.46)$$

Zaključak dobijen formulom (4.46) se potvrđuje kod prenosnih mreža i preko analize promene podužne komponente pada napona usled promene tokova aktivnih i reaktivnih snaga. Treba ukazati da su tokovi aktivnih snaga uglavnom nepromenljivi za specificirane zahteve potrošača (modelovane impedansom na sl. 4.6). Iz tih razloga promene podužne komponente (pa onda i ukupnog pada napona) su realno moguće samo sa promenama reaktivnih tokova, formula (4.46). Ovaj zaključak je validan kako za prenosne tako i za distributivne mreže i ima šire praktične implikacije.

Formula (4.46) se može primenjivati za razne procene i na nižim naponskim nivoima. Međutim, uvek je važno proveriti iznos greške koja se tada čini.

4.5. Proračuni gubitaka snage i energije

Veoma značajan segment u analizi EES predstavlja deo analize koji se odnosi na proračune gubitaka snage i energije. Za proračune gubitaka aktivne snage (reč je o omskim gubicima ili o gubicima usled Joule-ovog efekta) polazi se od osnovne veze kojom se gubici aktivne snage računaju kao:

$$P^{gub} = RI^2 \quad (4.47)$$

Sa P^{gub} su označeni trofazni gubici koji su prirodno od najvećeg interesa u trofaznim mrežama. U takvim okolnostima, pošto je R parametar po fazi, onda I mora biti računski (linijski) struja.

Prethodna relacija se obično iskazuje preko snaga, koje su principijelne nepoznate u elektroenergetskim mrežama, tako da se ima:

$$P^{gub} = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (4.48)$$

U (4.48) P i Q su trofazne snage a U je međufazni (linijski) napon pri nekom radnom stanju kojim je određena radna tačka sistema.

Na potpuno analogan način određuju se gubici reaktivne snage, Q^{gub} :

$$Q^{gub} = XI^2 \quad (4.49)$$

Sa Q^{gub} su ponovo označeni trofazni gubici pa pošto je X parametar po fazi, onda I mora biti međufazna (linijski) struja. Relacija (4.49) se takođe obično iskazuje preko snaga tako da se dobija:

$$Q^{gub} = X \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (4.50)$$

U (4.50) P i Q su ponovo trofazne snage, a U je međufazni (linijski) napon.

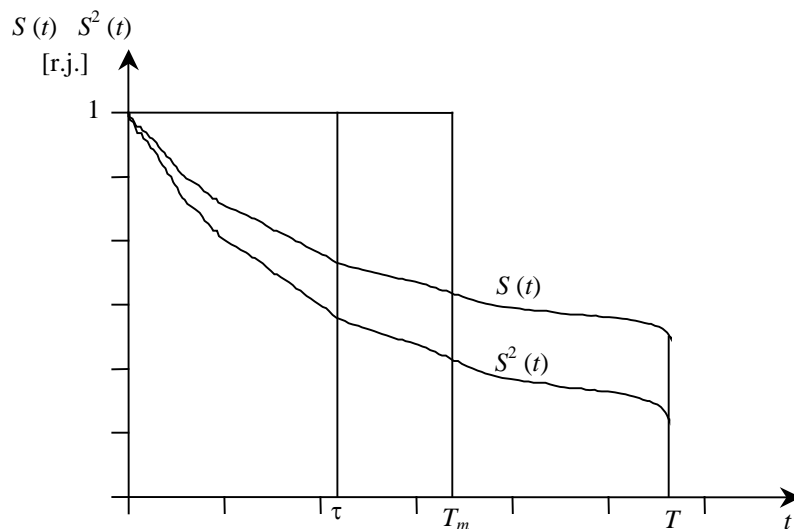
U principu se gubici snage mogu računati prema prethodnim formulama za svako karakteristično radno stanje. Zadatak se u jednostavnim šemama rešava školskom logikom - postupnim proračunima po pojedinim granama voda, transformatora ili nekog drugog elementa sistema. Međutim, u složenim mrežama neophodno je startovati računarski program za proračun tokova snaga i naponskih prilika koji u svojoj završnoj fazi računa i gubitke za poznate tokove snaga po granama i za poznate module napona po svim sabirnicama mreže. Prelazak na izračunavanje gubitaka energije je iznenađujuće složen. Naime, u principu bi za sva stanja trebalo startovati program za tokove snaga i zatim gubitke snage množiti sa trajanjem tih stanja zarad izračunavanja gubitaka energije. Tipičan zadatak u sistemu je proračun godišnjih gubitaka energije. Ako se pođe od pretpostavke da je karakteristično stanje određeno trajanjem jednog sata, onda se unutar jedne godine (od 365 dana) ima 8760 karakterističnih satnih stanja. To dalje znači da bi proračun tokova snaga morao da se izvrši 8760 puta i da se zatim izvrši sumiranje svih gubitaka u cilju proračuna godišnjih gubitaka energije. Očevidno je da je ovo zahtevan posao i za najmoćnije računare, kad su u pitanju složene mreže sa nekoliko stotina čvorova, i zato se u jednostavnijem pristupu pribegava aproksimativnoj proceni gubitaka energije. Ona se može uraditi na sledeći način.

Gubici aktivne energije, na vremenskom intervalu T (koji može da bude godina, sedmica, dan, ili bilo koji drugi period), se mogu prikazati na sledeći način:

$$W_g = \int_0^T P(t) dt = R \int_0^T I^2(t) dt = R \int_0^T \frac{S^2(t)}{U_n^2} dt \approx \frac{R}{U_n^2} \int_0^T S^2(t) dt \quad (4.51)$$

U (4.51) gubici energije se računaju preko integraljenja vremenske zavisnosti aktivne snage, odnosno preko integraljenja zavisnosti kvadrata efektivne vrednosti struje sa vremenom (ovde se podrazumeva da nije reč o zavisnosti trenutne vrednosti struje od vremena, već o zavisnosti od vremenske koordinate koja se prostire na celu godinu i kroz koju se manifestuju dnevne i sezonske varijacije opterećenja). U poslednjoj modifikaciji u relaciji (4.51) učinjena je pretpostavka da je radni napon tokom posmatranog perioda manje više konstantan i blizak nominalnoj vrednosti napona. U praksi su odstupanja od ove pretpostavke u granicama do 5% i za proračune gubitaka energije ova se pretpostavka može smatrati u inženjerskom smislu korektnom. Zadatak se, dakle, svodi na poznavanje zavisnosti kvadrata prividne snage od vremena, odnosno ponovo na potrebu za poznavanjem dijagrama opterećenja. Ova zavisnost se kao hronološki dijagram opterećenja u sistemu poznaje samo u karakterističnim tačkama opremljenim za merenje i registrovanje ovih informacija. Pretpostavlja se da je hronološki dijagram, kao onaj na sl. 3.1, na godišnjem nivou poznat i da je na osnovu njega generisan uređeni dijagram opterećenja prema logici slaganja opterećenja (prividne snage) u opadajući niz. Ovaj hronološki dijagram je korisno normalizovati, odnosno podeliti sve ordinate sa maksimalnom vrednošću prividne snage na godišnjem horizontu, S_{max} . Razlog za normalizaciju (uvođenje jediničnog sistema na specifičan način) se jasno uočava kad se razmotri grafik $S^2 = f(t)$, koji je u osnovi merodavan za proračune gubitaka energije. Zavisnost $S = f(t)$ i zavisnost $S^2 = f(t)$ u normalizovanoj formi su prikazane na sl. 4.10.

Površina ispod krive koja odgovara kvadratu prividne snage je srazmerna ukupnim gubicima energije u vremenskom intervalu T . Ova površina je osetno manja od površine ispod krive $S(t)$. Razlog za smanjenje ove površine upravo se vidi sa normalizovanog dijagrama. Naime ako se normalizovana vrednost prividne snage od 0,5 kvadrira dobija se vrednost od 0,25 i u toj srazmeri je površina smanjena. Na taj način normalizacija postaje od očevide koristi u ovom razmatranju.



Sl. 4.10 Uređeni normalizovani dijagrami prividne snage i kvadrata prividne snage

S druge strane ovi gubici energije mogu se logikom jednakosti površina izračunati i preko konstantnog opterećenja koje odgovara maksimumu prividne snage u sistemu ali koje traje osetno manji broj časova u poređenju sa celim intervalom, dakle τ časova (to je površina pravougaonika na sl. 4.10 čija je apscisa τ a ordinata maksimum kvadrata prividne snage). Ovi ekvivalentni gubici energije su dakle:

$$W_{ekv}^{gub} = \frac{R}{U_n^2} S_{max}^2 \tau \quad (4.52)$$

Izjednačavanjem izraza (4.51) i (4.52) dobija se:

$$\frac{R}{U_n^2} S_{max}^2 \tau = \frac{R}{U_n^2} \int_0^T S^2(t) dt \quad (4.53a)$$

što konačno daje definicioni izraz:

$$\tau = \frac{\int_0^T S^2(t) dt}{S_{max}^2} \quad (4.53b)$$

Saglasno prethodnoj definiciji vidi se da je uveden pojam ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka τ , ili kratko vreme gubitaka. Kako je već naglašeno ovo vreme se najčešće vezuje za godišnji period pa se govori o ekvivalentnom

vremenu trajanja godišnjih gubitaka. To je uslovno vreme za koje kroz element sistema protiče maksimalna struja, odnosno maksimalna prividna snaga, koja prouzrokuje iste godišnje gubitke energije kao i promenljiva struja (prividna snaga) koja se menja po stvarnom godišnjem dijagramu opterećenja na posmatranom elementu sistema. U skladu sa prethodnim rezonovanjem egzaktnija definicija bi se imala u slučaju kad se umesto sa prividnim snagama operiše sa strujama jer se, u takvim uslovima, ne mora uvoditi pretpostavka o konstantnosti napona. Prema tome, sasvim egzaktno bi se imalo:

$$\tau = \frac{\int_0^T I^2(t) dt}{I_{max}^2} \quad (4.54)$$

Saglasno prethodnom, primenom poznatog vremena trajanja maksimalnih gubitaka godišnji gubici energije se računaju kao:

$$W^{gub} = P_{max}^{gub} \tau \quad (4.55)$$

U (4.55) sa P_{max}^{gub} su označeni maksimalni gubici snage na godišnjem nivou koji se računaju prema (4.48) za radno stanje koje odgovara vršnom satu u godini (maksimalno opterećenje sistema). Glavna teškoća u primeni jednostavne formule (4.55) svodi se na činjenicu da dijagrami opterećenja (odnosno, dijagrami promena kvadrata opterećenja) nisu poznati. Zato se ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka određuje u inženjerskim računima na drugačiji način, korišćenjem empirijskih formula u kojima se τ nalazi preko drugih pokazatelja koji se u sistemu poznaju sa većom izvesnošću. Tipično se to radi preko ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnog opterećenja T_e , koje se računa prema (3.3). U literaturi se za slučaj godišnjeg dijagrama obično koristi sledeća veza:

$$\tau = aT_e + b \frac{T_e^2}{8760} \quad (4.56)$$

U (4.56) zbir konstanti a i b jednak je jedinici i obično se za prilike u našem sistemu uzima da je $a = 0,83$ i $b = 0,17$. Ove numeričke vrednosti zavise i od prosečnih vrednosti faktora snage i zato se za svaki sistem pažljivo moraju analizirati. Pored formule (4.56) za izračunavanje ekvivalentnog vremena trajanja gubitaka na godišnjem horizontu od 8760 h može se koristiti i sledeća empirijska formula:

$$\tau = 8760 \left(0,124 + \frac{T_e}{10000} \right)^2 \quad (4.57)$$

Primenu ovih formula odlikuje jednostavnost u korišćenju i minimalan skup zahtevanih ulaznih podataka. U analizi se zavisnost ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka može interpretirati i preko grafika u kojima se kao apscisa pojavljuje ekvivalentno vreme trajanja maksimalnog opterećenja, a kao parametar se javlja prosečan faktor opterećenja ($\cos \varphi$). Ima pristupa i determinističkog tipa kad se simulacijom pokriva veliki skup dijagrama opterećenja, a zatim se regresionom analizom nalaze analitičke zavisnosti.

Umesto da se analitički operiše sa ekvivalentnim vremenom trajanja gubitaka može se raditi i sa srednjom kvadratnom strujom koja je, uslovno, vremenski nepromenljiva struja koja u elementu sistema na razmatranom vremenskom periodu (npr. godina) stvara gubitke energije identične stvarnim godišnjim gubicima energije koje stvara promenljiva struja koja reprezentuje stvarni godišnji dijagram opterećenja elementa sistema. Ako se srednja kvadratna struja obeleži sa I_{sk} tada se ima (za $T = 8760$ h):

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{8760} \int_0^{8760} I^2(t) dt} \quad (4.58)$$

Poređenjem (4.54) i (4.58) jednostavno se uspostavlja veza između vremena trajanja maksimalnih gubitaka τ i srednje kvadratne struje I_{sk} :

$$I_{sk} = I_{max} \sqrt{\frac{\tau}{8760}} \quad (4.59)$$

U mnogim praktičnim situacijama može se smatrati da je $\cos \varphi \cong const$, pa je onda i odgovarajući $tg \varphi \cong const$. Pošto važi:

$$tg \varphi = \frac{P}{Q} \quad (4.60)$$

to se zamenom u (4.54) dobija:

$$\tau = \frac{\int_0^T \left(1 + \frac{Q}{P}\right)^2 P^2(t) dt}{P_{max}^2 + Q_{max}^2} \quad (4.61)$$

Izraz (4.61) se može i dalje pojednostaviti ako se pretpostavi da je opterećenje čisto aktivno po svojoj prirodi (termički uređaji). Tada se ima $Q = 0$, odnosno $\cos \varphi = 1$, tako da se uprošćeno dobija:

$$\tau = \frac{1}{P_{max}^2} \int_0^T P^2(t) dt \quad (4.62)$$

U formuli (4.62) ekvivalentno vreme trajanja gubitaka je iskazano samo preko aktivnog opterećenja.

Imajući u vidu način na koji je faktor opterećenja m definisan, prema (3.2), za dnevni dijagram opterećenja, sada se lako prelazi na analognu definiciju za godišnji dijagram opterećenja:

$$m = \frac{W_{god}}{8760 P_{max}^{god}} = \frac{P_{sr}^{god}}{P_{max}^{god}} \quad (4.63)$$

U analizi se ponekad kod proučavanja dijagrama opterećenja proizvodnih jedinica, (npr. termoagregata) uvodi i faktor oblika m_f (*form faktor*). Faktor oblika se definiše kao količnik efektivne i srednje vrednosti, odnosno kao:

$$m_f = \frac{P_{ef}}{P_{sr}} = \frac{\frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T P^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt} \quad (4.64)$$

Faktor oblika se može izračunati i na drugačiji način za slučaj kad su poznate vrednosti faktora opterećenja m na vremenskom intervalu T i vrednost ekvivalentnog vremena trajanja gubitaka τ na istom tom vremenskom intervalu. Ovakav pristup se pokazuje vrlo korisnim u nekim primenama.

Uvrštavanjem izraza (4.62) i (4.63) u (4.64) konačno se dobija:

$$m_f = \frac{1}{P_{sr}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} = \frac{1}{m P_{max}} \sqrt{\frac{1}{T} \tau P_{max}^2} = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\tau}{T}} \quad (4.65)$$

Na osnovu izraza (4.65) se vidi da, za pogon sa $\cos \varphi \cong 1$, faktor oblika može da se proceni veoma jednostavno preko prethodno nađenih pokazatelja koji opisuju dijagram opterećenja.

4.6. Analiza osnovnih sprega u trofaznim sistemima

Analiza EES u osnovi može da se bazira na proračunima jednofaznih modela ili trofaznih modela. Za trofazne simetrične sisteme pristup baziran na jednofaznim proračunima je i lakši i elegantniji. Važno je istaći da se nesimetrična radna stanja moraju trofazno proučavati i tretirati i da se u takvim okolnostima ne može pribeći pojednostavljenoj jednofaznoj predstavi. Predmet narednog razmatranja je uvođenje sprega *zvezda* i sprega *trougao* u analizu i pojašnjenje osnovnih veza između relevantnih fizičkih veličina kod tih sprega.

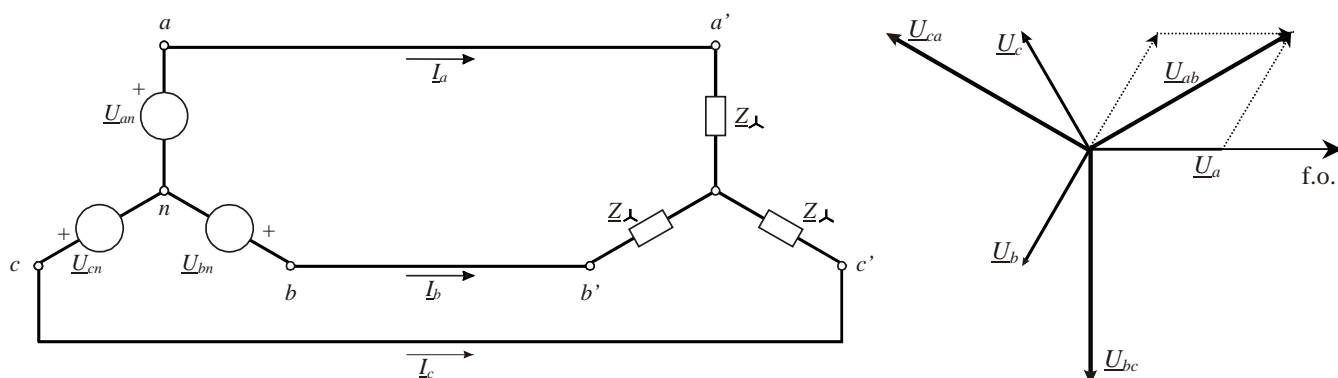
Kao što je već nekoliko puta naglašeno savremeni EES-i su uglavnom naizmjenični, trofazno koncipirani sistemi. Ovakav trofazni koncept predstavlja minimalan broj faza za koji se prednosti višefaznog prenosa mogu ostvariti. Pošto se u trofaznoj varijanti i izvori i prijemnici mogu vezivati u *zvezdu* ili u *trougao*, to su u osnovi moguće različite kombinacije. Od posebnog interesa su situacije sa spregom i izvora i prijemnika u *zvezdu*, (sl. 4.11), i situacije sa spregom izvora u *zvezdu* a sa spregom prijemnika u *trougao*, sl. 4.12.

Kod situacije kao na sl. 4.11 očividno je da su i na izvornoj i na prijemnoj strani (obe strane su spregnute u *zvezdu*) fazne vrednosti struja jednake linijskim (međufaznim) vrednostima struja, dok su linijske (međufazne) vrednosti napona $\sqrt{3}$ puta veće od faznih vrednosti napona. Obeležavanje linijskih veličina najjednostavnije je preko korišćenja dvostrukih indeksa, kao što je to urađeno na prethodnim slikama. Kod sprega u *zvezdu* zajednička tačka se naziva *zvezdište*, odnosno *neutralna tačka*, i kod uravnoteženih trofaznih sistema ona je na potencijalu nula. Skup fazora \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} i \underline{U}_{ca} čini skup fazora linijskih napona i oni imaju i module i fazne stavove različite od faznih napona. S druge strane može se uvesti skup fazora \underline{U}_{an} , \underline{U}_{bn} i \underline{U}_{cn} kao skup fazora faznih napona. Samo zbog kraćeg pisanja i samo u ovom delu knjige (deo 4.6) drugi indeks u obeležavanju faznih napona biće ispušten tako da se poslednji skup jednostavno piše kao \underline{U}_a , \underline{U}_b i \underline{U}_c . Inače u principu će fazni naponi biti obeležavani posebnim indeksom "f", odnosno oznakom U_f . Fazori linijskih napona po formalnoj logici koja se koristi u teoriji kola su dakle:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b \quad (4.66a)$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c \quad (4.66b)$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a \quad (4.66c)$$



Sl. 4.11 Trofazni koncept sa spregom izvora u zvezdu i spregom prijemnika u zvezdu sa odgovarajućim fazorskim dijagramom

Za fazore faznih napona se dalje jednostavno ima:

$$\underline{U}_a = U \cdot e^{j0^\circ} \quad (4.67a)$$

$$\underline{U}_b = U \cdot e^{-j120^\circ} \quad (4.67b)$$

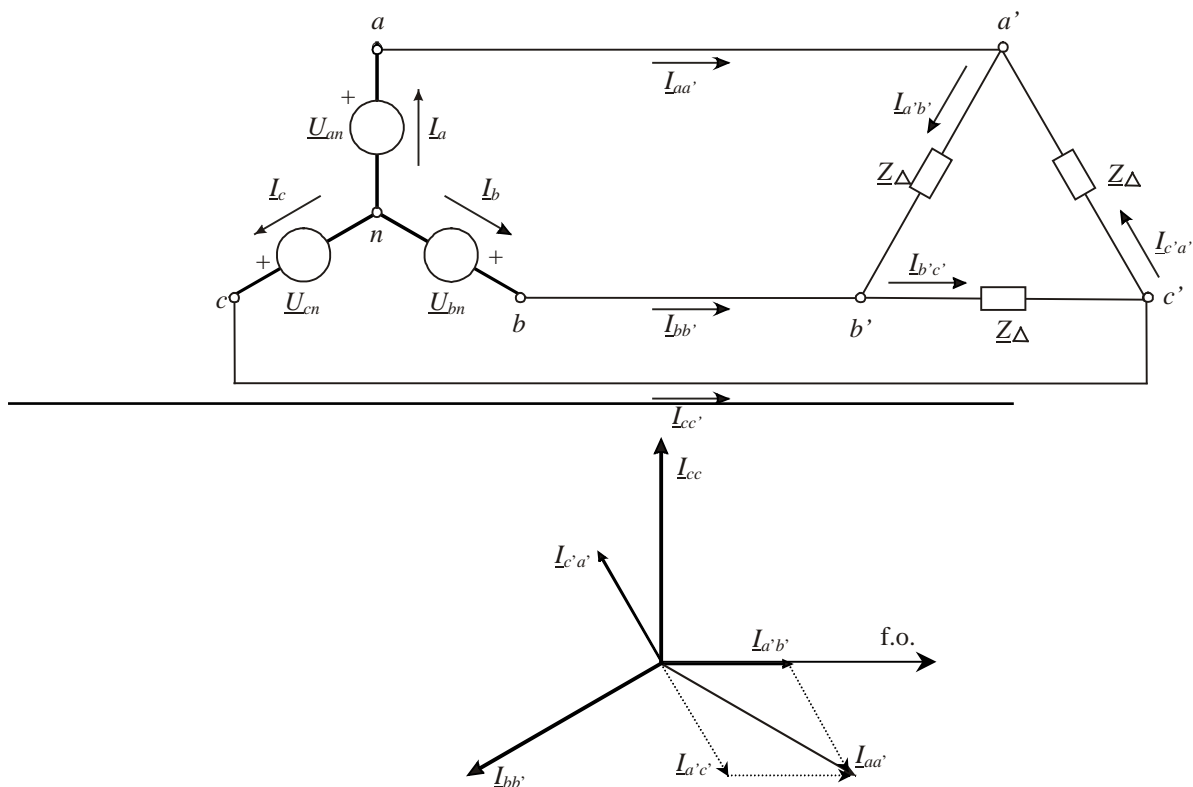
$$\underline{U}_c = U \cdot e^{j120^\circ} \quad (4.67c)$$

U prethodnim relacijama sa U je obeležena efektivna vrednost (modul) fazora faznog napona. Očevidno je da se za fazore linijskih napona formalno ima:

$$\underline{U}_{ab} = \sqrt{3}U \cdot e^{j30^\circ} \quad (4.68a)$$

$$\underline{U}_{bc} = \sqrt{3}U \cdot e^{-j90^\circ} \quad (4.68b)$$

$$\underline{U}_{ca} = \sqrt{3}U \cdot e^{j150^\circ} \quad (4.68c)$$



Sl. 4.12 Trofazni koncept sa spregom izvora u zvezdu i spregom prijemnika u trougao sa odgovarajućim fazorskim dijagramom

Relacije (4.68) pokazuju da fazori računskih (linijskih) napona formiraju trofazni uravnoteženi sistem sa modulima $\sqrt{3}$ puta većim od modula faznih napona. Još jednom je važno ukazati da fazni stavovi linijskih veličina nisu u analizi EES od posebnog interesa i zato se (umesto prethodno uvedenih fazora linijskih veličina kao u teoriji kola) definišu fazori računskih veličina koji su u fazi sa fazorima faznih veličina, ali sa modulima uvećanim za $\sqrt{3}$ puta.

Struja koja teče od tačke a ka tački a' (linijska struja) jednaka je struji koja teče od n ka a (fazna struja), odnosno jednaka je unutrašnjoj struji izvora spregnutog u zvezdu. Analogno važi i za preostale dve faze b i c .

Kod situacije kao na sl. 4.12 očevidno je da su na prijemnoj strani fazne vrednosti napona jednake linijskim (međufaznim) vrednostima napona, dok su linijske (međufazne) vrednosti struja $\sqrt{3}$ puta veće od faznih vrednosti struja. Fazori linijskih struja za spregu u trougao nalaze se primenom I Kirchhof-ovog zakona za tačke a' , b' i c' na sl. 4.12 odakle se dobija:

$$\underline{I}_{aa'} = \underline{I}_{a'b'} - \underline{I}_{c'a'} \quad (4.69a)$$

$$\underline{I}_{bb'} = \underline{I}_{b'c'} - \underline{I}_{a'b'} \quad (4.69b)$$

$$\underline{I}_{cc'} = \underline{I}_{c'a'} - \underline{I}_{b'c'} \quad (4.69c)$$

Kako fazne struje čine sledeći sistem:

$$\underline{I}_{a'b'} = I \cdot e^{j0^\circ} \quad (4.70a)$$

$$\underline{I}_{b'c'} = I \cdot e^{j120^\circ} \quad (4.70b)$$

$$\underline{I}_{c'a'} = I \cdot e^{j120^\circ}, \quad (4.70c)$$

to je očevidno da se za fazore linijskih struja formalno ima:

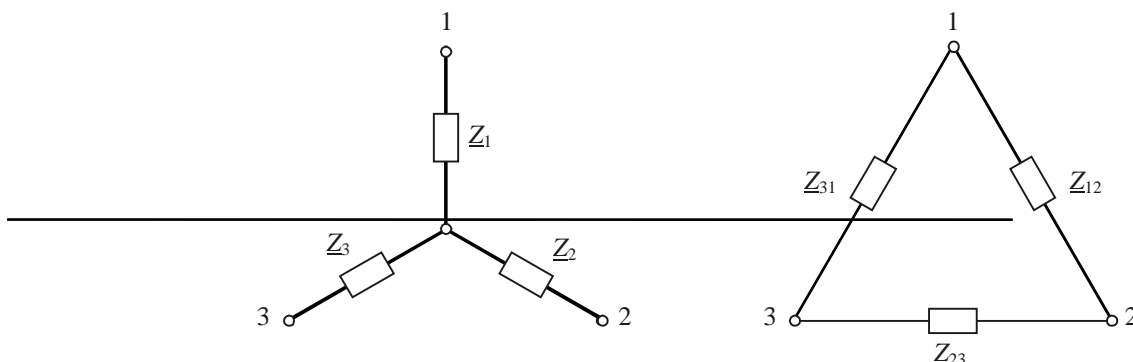
$$\underline{I}_{aa'} = \sqrt{3}I \cdot e^{-j30^\circ} \quad (4.71a)$$

$$\underline{I}_{bb'} = \sqrt{3}I \cdot e^{-j150^\circ} \quad (4.71b)$$

$$\underline{I}_{cc'} = \sqrt{3}I \cdot e^{-j90^\circ}. \quad (4.71c)$$

U prethodnim relacijama sa I je obeležena efektivna vrednost (modul) fazora fazne struje. Relacije (4.71) su ilustrovane na sl. 4.12 i pokazuju da fazori linijskih struja formiraju trofazni uravnoteženi sistem sa modulima $\sqrt{3}$ puta većim od modula faznih struja kod sprege prijemnika u trougao. Kao i u prethodnim slučajevima fazni stavovi linijskih veličina nisu u analizi EES od posebnog interesa.

U analizi EES često se koriste transformacije tipa *zvezda – trougao* (ili transformacije u suprotnom smeru) i zato je od interesa pokazati osnovni koncept. Ako se pođe od sl. 4.13 tada se za poznata tri (i samo tri) kraja u nekom kolu sa tri impedanse spregnute u zvezdu može naći ekvivalent sa tri impedanse spregnute u trougao bez promene stanja u preostalom delu kola. Ovo važi za linearna kola. Pokazuje se da važi i obrnuta logika pri transformaciji *trougao - zvezda*. Dokaz je jednostavan pošto se računaju impedanse za tri para krajeva u obema konfiguracijama i zatim se izjednačavaju. Ovim se dobijaju tri jednačine sa tri nepoznate.



Sl. 4.13 Transfiguracija zvezda – trougao

Dakle, za poznate impedanse trougla pokazuje se da su impedanse ekvivalentne zvezde:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}} \quad (4.72a)$$

Prethodna formula može se generalizovati na sledeći način:

$$\underline{Z}_{zvezde} = \frac{\text{proizvod impedansi trougla za posmatrani kraj}}{\text{zbir svih impedansi u trouglu}} \quad (4.72b)$$

Za slučaj poznatih impedansi zvezde se ima:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} \quad (4.73a)$$

Prethodna formula može se generalizovati na sledeći način:

$$\underline{Z}_{trougla} = \frac{\text{suma proizvoda parova impedansi zvezde}}{\text{impedansa nasuprot posmatrana dva kraja}} \quad (4.73b)$$

Ako su sve tri impedanse međusobno jednake tada, naravno, važi:

$$\underline{Z}_{zvezde} = \frac{\underline{Z}_{trougla}}{3} \quad (4.73c)$$

Ove formule važe i za impedanse date u jediničnom sistemu. Primena ovih formula često vodi pojednostavljenju složenih šema. Pri tome treba posebnu pažnju obratiti na raspodele faznih i linijskih struja pri prelazu od jedne sprege na drugu.

4.7. Proračuni voda

Osnovne jednačine uvedene kod modelovanja voda su pokazale da one mogu da se primenjuju nezavisno od problema koji se proučava. Tako se u principu jednačine telegrafičara mogu koristiti i za elektroenergetske i za telekomunikacione vodove. Međutim, kod telekomunikacionih vodova same dužine vodova su osetno veće od talasne dužine voda dok je kod elektroenergetskih vodova realna dužina (tipično nekoliko stotina kilometara ili manje) svega deo talasne dužine (koja iznosi 6000 km za 50 Hz). Kod telekomunikacionih vodova normalna radna stanja se odvijaju na visokim učestanostima i u cilju izbegavanja deformacije talasa vod se praktično mora zatvoriti karakterističnom impedansom. Kod elektroenergetskih vodova opterećenje na kraju voda ne mora da bude blisko karakterističnoj impedansi i po pravilu je osetno manje. Ali, ako su visokonaponski prenosni vodovi veoma dugački (duži od 500 km) tada zatvaranje ovakvih vodova sa karakterističnom impedansom postaje imperativ.

Ekonomičnost i pouzdanost su zahtevi od primarnog interesa kod nadzemnih vodova i zato odgovarajuće koncepcije mreža kao i gubitke aktivne snage treba prilagoditi ovim zahtevima. Zarad povećanja prenosne moći dalekovoda i smanjenja gubitaka treba ili preći na viši naponski nivo ili smanjiti karakterističnu impedansu (koristeći npr. rednu kompenzaciju).

Prenosna moć dalekovoda je u opštem slučaju ograničena sa jednim od sledeća tri fenomena:

- maksimalno dozvoljenim padom napona,
- termičkom granicom voda (trajno dozvoljenom strujom, odnosno gustinom struje) i
- granicom stabilnosti.

Koji će od ova tri fenomena prvi biti ugrožen zavisi od dužine voda i radnog stanja na vodu. Po pravilu se pokazuje da je za kraće vodove termička granica najizraženija dok je za duge vodove granica stabilnosti ona granica do koje se prvo dostiže.

4.7.1. Prazan hod voda

Ako je vod u praznom hodu tada se stavljanjem $\underline{I}_2 = 0$ u jednačine telegrafičara, formule (2.119) i (2.120), jednostavno dobija:

$$\underline{U}(x) = \frac{\underline{U}_2}{2} e^{\gamma x} + \frac{\underline{U}_2}{2} e^{-\gamma x} \quad (4.74a)$$

$$\underline{I}(x) = \frac{\underline{U}_2}{2\underline{Z}_C} e^{\gamma x} - \frac{\underline{U}_2}{2\underline{Z}_C} e^{-\gamma x} \quad (4.75a)$$

Daljim razvojem konstante prostiranja $\underline{\gamma}$ ima se:

$$\underline{U}(x) = \frac{\underline{U}_2}{2} e^{\alpha x} e^{j\beta x} + \frac{\underline{U}_2}{2} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (4.74b)$$

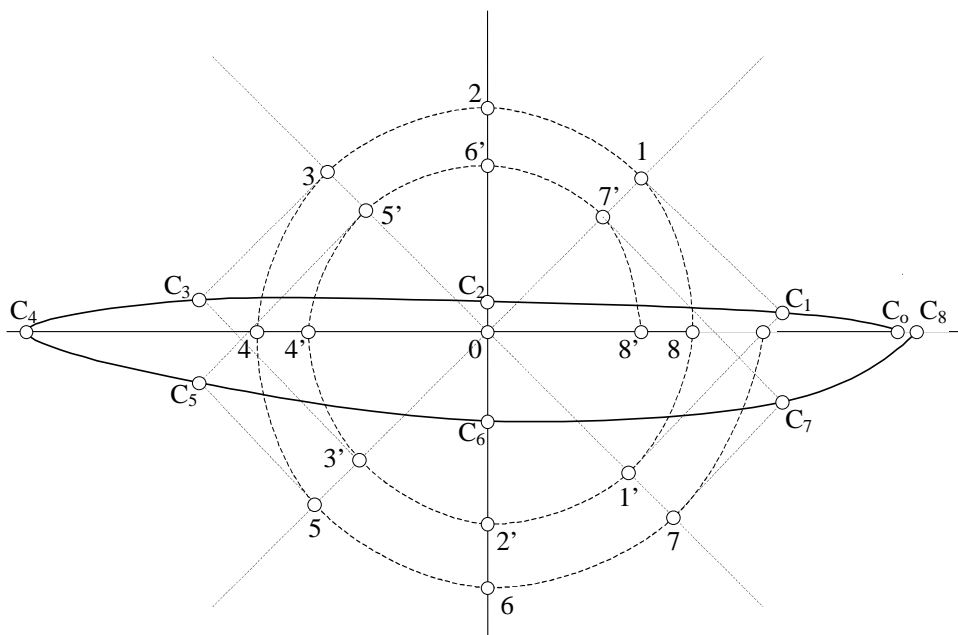
$$\underline{I}(x) = \frac{\underline{U}_2}{2\underline{Z}_C} e^{\alpha x} e^{j\beta x} - \frac{\underline{U}_2}{2\underline{Z}_C} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (4.75b)$$

Sabirci u izrazima (4.74) i (4.75) sa pozitivnim eksponentima matematički se predstavljaju sa logaritamskim spiralama čiji poluprečnici rastu sa porastom prostorne koordinate x (spirale koje se odmatavaju), dok se sabirci sa negativnim eksponentima predstavljaju sa logaritamskim spiralama koje smanjuju prečnik sa porastom x . Iz tih razloga ovi dijagrami se nazivaju spiralnim dijagramima i ilustrovani su samo za napon na sl. 4.14. Ovde je napon na prijemnom kraju izabran za referentni sa faznim stavom 0. Uočava se da se pri uglu od 45° napon \underline{U} dobija sabiranjem vektora 01 i 01'. Ovaj napon (koji bi se fizički imao na realnom vodu sa stvarnom dužinom od nešto ispod 750 km) nije u fazi sa naponom na kraju voda. Vektor 01 je određen uglom od 45° i svojim modulom, a vektor 01' je određen uglom od -45° i svojim manjim modulom. Prema tome, napon na kraju voda kasni za naponom na početku voda za ugao jednak električnoj ugaonoj dužini voda $\lambda_x = \beta x$. Slično se generišu i sve ostale tačke na spiralnom dijagramu napona, a spiralni dijagram struja se dobija analogno s tim da treba voditi računa da se kod njegovog formiranja vektori međusobno oduzimaju.

Za idealizovan vod, odnosno za vod bez gubitaka aktivne snage, važi: $\underline{\gamma} = j\beta$, odnosno $\underline{Z}_C = Z_C = \sqrt{\frac{l}{c}}$, tako da se prethodne jednačine u tom slučaju svode na:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cos(\beta x) \quad (4.76a)$$

$$\underline{I}(x) = j \left(\frac{\underline{U}_2}{Z_C} \right) \sin(\beta x) \quad (4.77a)$$



Sl. 4.14 Spiralni dijagrami napona

Naravno, stavljajući $x = L_v$ dobijaju se veličine na predajnom kraju 1 (pošto prostorna koordinata x raste od kraja ka početku voda):

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta L_v = \underline{U}_2 \cos \lambda \quad (4.76b)$$

$$\underline{I}_1 = j \left(\frac{\underline{U}_2}{Z_C} \right) \sin \beta L_v = j \left(\frac{\underline{U}_2}{Z_C} \right) \sin \lambda \quad (4.77b)$$

U relacijama (4.76b) i (4.77b) uvedena je električna ugaona dužina voda λ kao proizvod fazne konstante i dužine voda, $\lambda = \beta L_v$, koja se izražava u stepenima ili radijanima. Za idealizovan dalekovod dužine 100 km ova električna ugaona dužina iznosi 6° .

Iz izraza (4.76b) se vidi da su u bilo kojoj tački idealizovanog voda naponi međusobno u fazi. Posledica toga je da se spiralni dijagram u ovom slučaju degeneriše u realnu osu.

Kombinujući prethodne jednačine direktno se dobija:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_1 \frac{\cos \beta x}{\cos \lambda} \quad (4.78)$$

$$\underline{I}(x) = j \frac{\underline{U}_1}{Z_C} \frac{\sin \beta x}{\cos \lambda} \quad (4.79)$$

Preko izraza (4.78) i (4.79) moguće je izvršiti analizu rada voda u praznom hodu za proizvoljnu tačku na vodu. Prilikom ovih razmatranja obično se pretpostavlja da je napon na početku voda po modulu konstantan. Uz takvu pretpostavku, ako se kao primer uzme dalekovod dužine 200 km, kod koga je električna ugaona dužina 12° , primenom prethodnih relacija se napon na kraju 2 nalazi kao:

$$U_2 = \frac{U_1}{\cos 12^\circ} = 1,0223U_1 \quad (4.80)$$

Očevidno je da se u praznom hodu ima pojava porasta napona u smeru proticanja struje. Razlog ovome je proticanje kapacitivne struje (struje praznog hoda) kroz redne reaktanse. Ovaj fenomen je poznat kao Ferrantijev efekat. Posebno se uočava na slabo opterećenim vodovima, i o njemu se vodi računa kod dugačkih vodova. U prethodnom primeru vidi se da je povećanje napona na kraju 200 km dugačkog voda svega 2,23%. Na sličan način se može analizirati i porast struje praznog hoda (koja je kapacitivna) sa dužinom dalekovoda. Potrebno je ukazati da je ova struja svega mali deo struje pri većim opterećenjima (npr. pri režimu prenosa prirodne snage).

Treba uočiti da jedini parametar voda, osim dužine voda, koji upliviše na rezultate analiza u praznom hodu je parametar β . Pošto je on po prirodi stvari na nadzemnim vodovima manje više konstantan, to se prethodni zaključci mogu generalizovati. Dakle, udvostručenje napona na prijemnom kraju idealizovanog voda u praznom hodu se ima za dalekovod dugačak 1000 km, za koji je $\lambda = 60^\circ$. Odgovarajući grafik je predstavljen na sl. 4.15.

U prethodnim razmatranjima modul napona na predajnom kraju voda, (kraju 1), je bio konstantan. U praksi usled naglog isključenja voda na prijemnom kraju (kraju 2), dolazi do porasta napona i na predajnom kraju i to zbog proticanja kapacitivne struje kroz dominantno induktivne reaktanse. Ove reaktanse se nalaze fizički ispred tog kraja i one reprezentuju obično generator i transformator vezane za kraj 1.

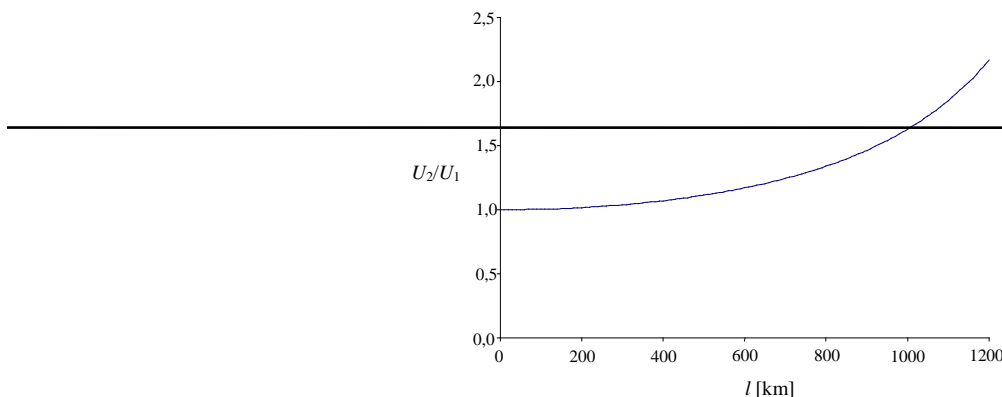
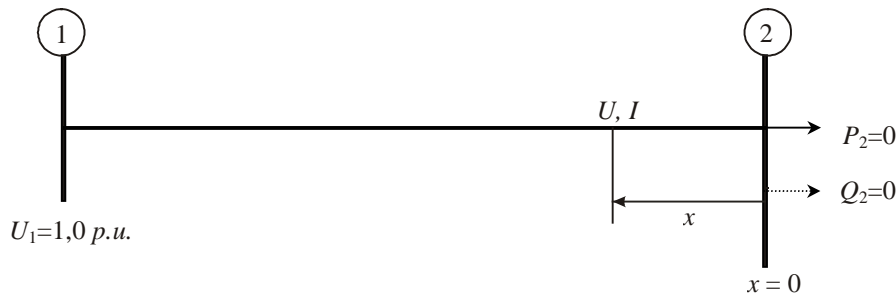
Ulazna impedansa voda u praznom hodu nalazi se kao:

$$\underline{Z}_{ul} = \frac{U}{I} \quad (4.81)$$

gde su brojitelj i imenitelj napon i struja na ulazu u vod, respektivno. Za idealizovan vod se dobija:

$$\underline{Z}_{ul} = \frac{U_2 \cos \lambda}{jU_2 \sin \lambda Z_C} = -jZ_C \operatorname{ctg} \lambda \quad (4.82)$$

Za realne vodove, dužine do 1500 km, ova ulazna impedansa ima kapacitivni karakter posmatrano sa strane izvora. Podrazumeva se da je izvor priključen na predajni kraj voda (kraj 1).



Sl. 4.15 Promena napona duž idealizovanog voda u praznom hodu

Tabela 4.1 Odnosi modula napona za dalekovode različitih dužina u praznom hodu

L_v [km]	50	100	200	400	600	800	1000	1400
λ [°]	3	6	12	24	36	48	60	84

U_2/U_1	1,00013	1,0055	1,0223	1,094	1,236	1,494	2	9,56
-----------	---------	--------	--------	-------	-------	-------	---	------

4.7.2. Prenos prirodne snage

Režim prenosa prirodne snage ima se na vodu kada je vod na svom prijemnom kraju zatvoren karakterističnom impedansom \underline{Z}_C , (sl. 4.16), odnosno talasnom impedansom koja je u slučaju idealizovanog voda čisto realna. Ovaj režim okarakterisan je vrlo jednostavnim relacijama koje povezuju napone i struje duž voda. U cilju ilustracije osobina ovog režima treba poći od predstave voda sa raspodeljenim parametrima. Jednačina koja na kraju 2 povezuje napon i struju je u ovom slučaju:

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_C \underline{I}_2 \quad (4.83)$$

Uz uvažavanje relacije (4.83) i stavljaajući $x = L_v$ u izraze (2.120) i (2.121) računaju se napon i struja na predajnom kraju 1 kao:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 (ch \underline{\gamma} L_v + sh \underline{\gamma} L_v) = \underline{U}_2 e^{\underline{\gamma} L_v} \quad (4.84)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 (ch \underline{\gamma} L_v + sh \underline{\gamma} L_v) = \underline{I}_2 e^{\underline{\gamma} L_v} \quad (4.85)$$

Ako se relacije (4.84) i (4.85) podele i uvaži (4.83), tada se dobija:

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \underline{Z}_C \quad (4.86)$$

Preuređivanjem relacija (4.84) i (4.85) direktno se ima:

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} = e^{-\underline{\gamma} L_v} \quad (4.87)$$

Jednačina (4.87) je kompleksna i predstavljajući kompleksne napone preko modula i argumenta:

$$\underline{U}_1 = U_1 e^{j\theta_1} \quad (4.88a)$$

$$\underline{U}_2 = U_2 e^{j\theta_2} \quad (4.88b)$$

i kompleksne struje na analogan način:

$$\underline{I}_1 = I_1 e^{j\theta_{11}} \quad (4.89a)$$

$$\underline{I}_2 = I_2 e^{j\theta_{12}} \quad (4.89b)$$

dobija se:

$$\frac{U_2}{U_1} e^{j(\theta_2 - \theta_1)} = e^{-\alpha L_v} e^{-j\beta L_v} \quad (4.90)$$

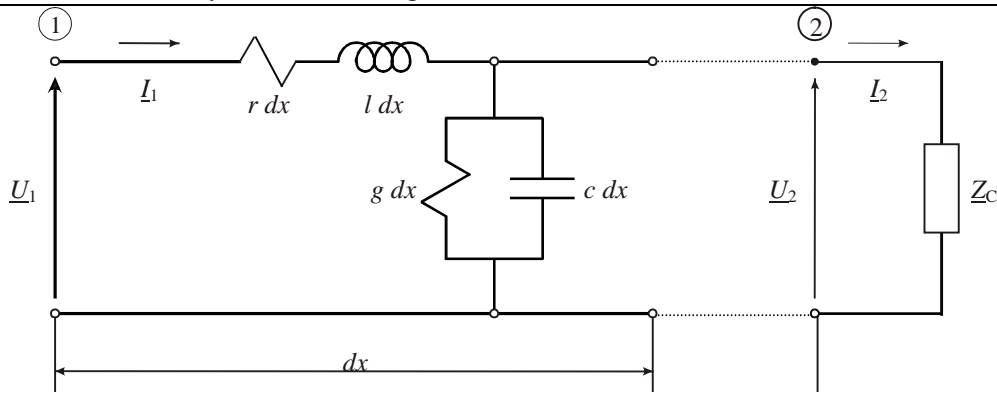
odnosno:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_2}{I_1} = e^{-\alpha L_v} \quad (4.91)$$

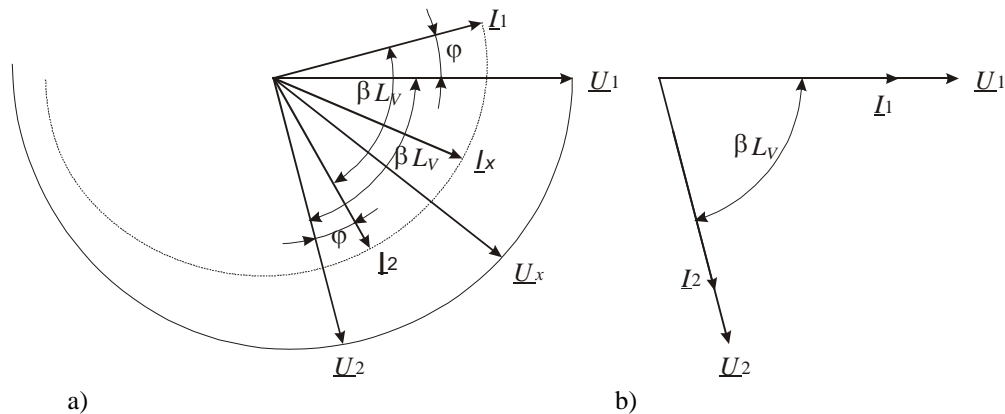
i

$$\theta_1 - \theta_2 = \theta_{11} - \theta_{12} = \beta L_v \quad (4.92)$$

U relacijama (4.89) za označavanje faznog stava struja izbegnuta je oznaka β , kao što je bilo urađeno u relaciji (4.8a), da ne bi došlo do konfuzije sa oznakom faznog koeficijenta. Fizičko značenje ovih jednačina grafički je ilustrovano na sl. 4.17. Ponovo se vrhovi fazora napona i struje, za realan vod sa gubicima, kreću po spirali (spiralni dijagram, sl. 4.17a), odnosno po krugu za idealizovan vod bez gubitaka (sl. 4.17b).



Sl. 4.16 Vod predstavljen raspodeljenim parametrima i zatvoren karakterističnom impedansom \underline{Z}_C



Sl. 4.17 Spiralni dijagram fazora napona i struje a) za realan vod u režimu prenosa prirodne snage, b) za idealizovan vod u režimu prenosa prirodne snage

Sa spiralnog dijagrama realnog voda se vidi da su moduli napona i struje na kraju voda manji od modula na početku voda, jer je konstanta slabljenja $\alpha > 0$. Moduli napona kod idealizovanog voda se ne menjaju pošto je konstanta slabljenja kod njega $\alpha = 0$.

Sa sl. 4.17 se vidi da struja prednjači naponu u slučaju kad je vod na svom prijemnom kraju opterećen isključivo aktivnim opterećenjem. Ovo je posledica činjenice da je karakteristična impedansa voda slabo kapacitivna,.

Na osnovu opštih formula analitički se lako uspostavljaju zavisnosti napona u bilo kojoj tački na vodu od napona na kraju voda ili od napona na početku voda.

Kod realnih vodova prirodna snaga je kompleksna veličina koja je jednaka prirodnoj snazi na prijemnom kraju:

$$\underline{S}_2 = \underline{U}_2 \underline{I}_2^* = \frac{U_2^2}{\underline{Z}_C^*} = \underline{S}_{nat} \quad (4.93)$$

Prividna snaga u bilo kojoj drugoj tački x voda se lako preračunava preko koeficijenta slabljenja i iznosi:

$$\underline{S}(x) = \underline{U}_x \underline{I}_x^* = \frac{U_2^2}{\underline{Z}_C^*} e^{2\alpha x} = \underline{S}_{nat} e^{2\alpha x} \quad (4.94)$$

Takođe, treba konstatovati da je kod realnih vodova karakteristična impedansa tipično slabo kapacitivna, što znači da struja duž voda prednjači naponu za neki mali ugao φ .

Kod idealizovanih vodova vidi se da se moduli napona i struje ne menjaju duž voda u režimu prenosa prirodne snage i da su samo pomereni za ugao jednak električnoj ugaonoj dužini voda. Isto tako je očevidno da su napon i struja u svakoj tački idealizovanog voda u ovakvom režimu u fazi. Prividne snage u ovim okolnostima su aktivne i u svakoj tački su jednake i iznose:

$$\underline{S}(x) = \underline{S}_{nat} = P_{nat} = \frac{U_1^2}{Z_C} = \frac{U_x^2}{Z_C} = \frac{U_2^2}{Z_C} \quad (4.95)$$

Prirodna snaga se u praksi definiše preko nominalnog napona voda i iznosi:

$$P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_C} \quad (4.96)$$

Kako je odnos napona i struje u bilo kojoj tački voda u režimu prenosa prirodne snage upravo jednak karakterističnoj impedansi (u ovom slučaju to je i ulazna impedansa voda) to se za slučaj idealizovanog voda može pisati:

$$\frac{U(x)}{I(x)} = Z_c = \sqrt{\frac{L}{c}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.97)$$

U (4.97) sa $L = lL_v$ je označena ukupna induktivnost voda, a sa $C = cL_v$ ukupna kapacitivnost voda. Naravno, ukupni parametri se nalaze množenjem podužnih parametara sa dužinom voda.

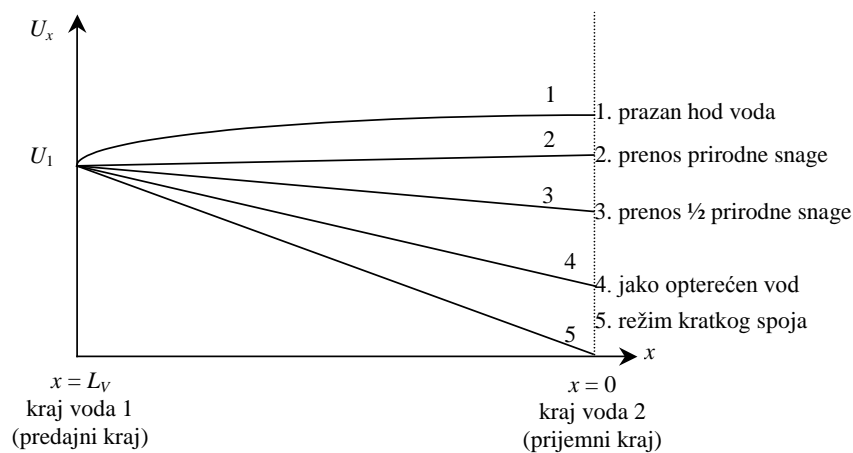
Proširujući izraz (4.97) da bi dobio dimenzije energije, dobija se :

$$\frac{LI(x)^2}{2} = W_{elmagn} = \frac{CU(x)^2}{2} = W_{elstat} \quad (4.98)$$

Relacija (4.98) precizno određuje prilike u vezi sa reaktivnim snagama (energijama) na idealizovanom vodu u režimu prenosa prirodne snage. Vidi se da se ima jednakost reaktivne energije koju proizvode otočne kapacitivnosti voda sa reaktivnom energijom koju troše redne induktivnosti voda. Drugim rečima, u ovom režimu vod sam sebe kompenzuje. Ako se ovaj vod posmatra kao četverokrajnik to se efekti reaktivnih snaga spolja ne vide. Idealizovan vod se ponaša tako da na ulazu ima aktivnu snagu jednaku prirodnoj, koja se nepromenjena pojavljuje i na izlazu voda. Realni vodovi u režimima rada bliskim prenosu prirodne snage se vrlo malo razlikuju od ove date idealizovane slike.

U praksi vodovi nisu zatvoreni svojom karakterističnom (talasnom) impedansom. Umesto toga opterećenje može da varira od dela prirodne snage za vreme perioda male potrošnje, do nekoliko puta većih opterećenja za vreme velike potrošnje. Ove pojave zavise i od dužine voda kao i od eventualne kompenzacije reaktivnih snaga na vodu. Još jednom je potrebno naglasiti da se ova analiza odnosi na idealizovan vod, odnosno na vod bez gubitaka aktivne snage. Ako idealizovan vod nije zatvoren svojom karakterističnom impedansom onda naponski profil nije ravan, tj. postoji neki pad napona duž voda. To je ilustrovano na sl. 4.18 za slučaj voda dužine L_v sa konstantnim modulom napona na predajnom kraju (kraj1). Ova slika je validna za vodove duge do $\frac{1}{4}$ talasne dužine.

Na sl. 4.18 je prikazano 5 krivih: kriva 1 predstavlja naponski profil voda u praznom hodu (relacija 4.76b), kriva 2 naponski profil u režimu prenosa polovine prirodne snage, kriva 3 naponski profil u režimu prenosa prirodne snage (modul napona na idealizovanom vodu u režimu prenosa prirodne snage je konstantan), kriva 4 predstavlja naponski profil pri opterećenjima voda većim od prirodne snage (ovaj naponski profil je po prirodi stvari iznad profila koji odgovara kratkom spoju i određen je veličinom opterećenja na vodu) i kriva 5 predstavlja naponski profil pri kratkom spoju na prijemnom kraju.



Sl. 4.18 Profili napona duž voda

4.7.3. Praktične mogućnosti opterećivanja voda

Polazeći od prve od jednačina četverokrajnika, koja će ovde biti zbog preglednosti izlaganja ponovljena:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2 \quad (4.99)$$

i rešavajući (4.99) po izlaznoj struji dobija se:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_1 - \underline{A}\underline{U}_2}{\underline{B}} \quad (4.100)$$

Parametri ekvivalentnog četverokrajnika biće predstavljeni preko modula i argumenta, odnosno ima se:

$$\underline{A} = \cosh(\gamma L_v) = Ae^{j\theta_A} = \underline{D} \quad (4.101)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_C \sinh(\gamma L_v) = Z'e^{j\theta_Z} \quad (4.102)$$

U (4.101) ponovo je konstatovano da su parametri \underline{A} i \underline{D} jednaki. Za argument parametra \underline{A} uzeta je oznaka θ_A , a za argument parametra \underline{B} uzeta je oznaka θ_Z zbog njegove povezanosti sa rednom impedansom. Za fazore napona usvojena je standardna analitička predstava data relacijama (4.88). Pri tome se obično argument napona \underline{U}_2 (ugao θ_2) usvaja da je jednak nuli, odnosno uzima se da je fazor napona na prijemnom kraju referentni fazor. Za argument napona \underline{U}_1 je onda dovoljno uzeti oznaku samo θ (bez indeksa).

Ovakvim modelovanjem praktično se mogu analizirati svi radni režimi na nadzemnim vodovima gotovo svih dužina. Pravidna snaga koja se ima na izlaznom (prijemnom) kraju je:

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \underline{U}_2 \underline{I}_2^* = U_2 \left[\frac{U_1 e^{j(\theta_Z - \theta)} - AU_2 e^{j(\theta_Z - \theta_A)}}{Z'} \right] \quad (4.103)$$

Odnosno dobija se:

$$\underline{S}_2 = \frac{U_2 U_1}{Z'} e^{j(\theta_Z - \theta)} - \frac{AU_2^2}{Z'} e^{j(\theta_Z - \theta_A)} \quad (4.104)$$

Prvi scenario od interesa za analizu je slučaj kad je prijemni kraj (kraj 2) pasivan. Aktivna i reaktivna snaga koju vod tada na svom prijemnom kraju (kraj 2), predaje potrošačkom centru (grupi prijemnika) je:

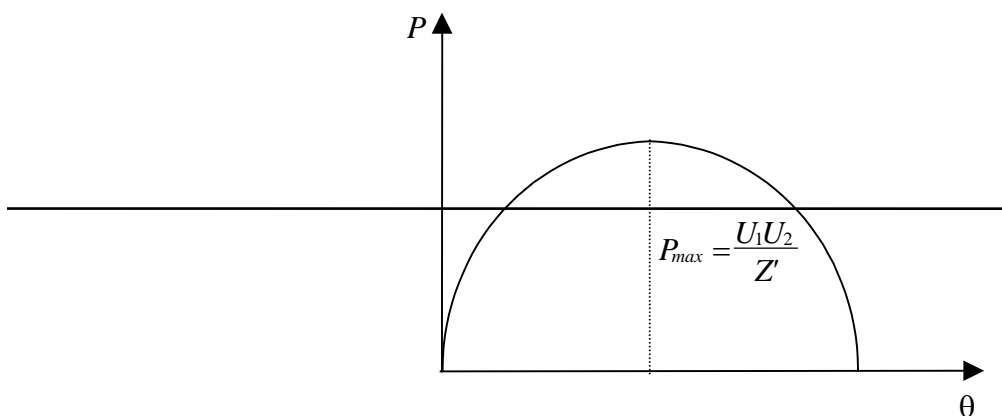
$$P_2 = \operatorname{Re}\{\underline{S}_2\} = \frac{U_1 U_2}{Z'} \cos(\theta_Z - \theta) - \frac{AU_2^2}{Z'} \cos(\theta_Z - \theta_A) \quad (4.105)$$

$$Q_2 = \operatorname{Im}\{\underline{S}_2\} = \frac{U_1 U_2}{Z'} \sin(\theta_Z - \theta) - \frac{AU_2^2}{Z'} \sin(\theta_Z - \theta_A) \quad (4.106)$$

Teorijski maksimum aktivne snage koja se može preneti (ili granica stabilnosti stacionarnog stanja) ima se kada je $\theta = \theta_Z$:

$$P_{2max} = \frac{U_1 U_2}{Z'} - \frac{AU_2^2}{Z'} \cos(\theta_Z - \theta_A) \quad (4.107)$$

Imajući u vidu da je za idealizovan vod $\theta_Z = 90^\circ$ i $\theta_A = 0^\circ$ to se vidi da se zavisnost aktivne snage od ugla idealizovanog voda (ugaona karakteristika aktivne snage) svodi na sinusoidu koja prolazi kroz koordinatni početak, i koja je prikazana na sl. 4.19.



Sl. 4.19 Zavisnost aktivne snage od ugla na idealizovanom vodu

Granica stabilnosti je uslovljena prirodom sistema sa aspekta njegovog statički stabilnog rada. U suštini ne treba dozvoliti da se prekorači ograničenje nametnuto granicom stabilnosti zbog ispadanja iz sinhronizma sinhronih generatora na predajnom (ulaznom) kraju. O stabilnosti će biti više reči u delu analize EES koji se bavi ovom problematikom. Ovakvim konceptom kraj 1 je aktivni kraj voda (sa izvorima), a kraj 2 je pasivni kraj (sa potrošačima), ili kako se to još može formulisati, reč je o radijalnom vodu na kome se snaga uvek prenosi samo u jednom smeru.

Drugi scenario od interesa je mogućnost da se vod napaja sa oba kraja, dakle vod je sa aktivnim i predajnim i prijemnim krajem, odnosno to je slučaj kad je napon podržan sa obe strane sa izvorima (generatorski krajevi). U ovakvim okolnostima snaga po vodu može da teče u oba smera.

Umesto na četverokrajnicima ove analize je moguće interpretirati i preko jednačina injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga, na način sličan onom koji se koristi u proračunima tokova snaga. Ovdje će se izložiti samo jedna varijanta ovih opštih jednačina u cilju da se detaljnije prouči prenos snage vodom. Za početak se pretpostavlja da se radi o kratkom vodu koji je za modelovanje najjednostavniji. Primenjuje se koncept u kome se u monofaznim šemama imaju računski fazori napona i struja tako da se kao posledica toga imaju trofazne snage. Polazi se od jednostavnog dvosabirničkog sistema, aktivnog na oba kraja, prikazanog na sl. 4.20. Pošto je zadatak da se prouče pojave vezane za prenos snage vodom, to se onda izvori G_1 i G_2 mogu zameniti sa idealnim naponskim generatorima. Vodovi se modeluju samo rednom impedansom, tako da je odgovarajuća ekvivalentna šema prikazana na sl. 4.21. Oznaka za impedansu nema indeks voda, jer u opštem slučaju u tu impedansu mogu da budu uključeni i drugi elementi sistema (transformatori). Kompleksna snaga \underline{S}_{12} je snaga koja se sa sabirnica 1 predaje vodom ka sabirnicama 2. Slično se ima i za \underline{S}_{21} koja predstavlja snagu koja se sa sabirnica 2 predaje vodom ka sabirnicama 1.

Analički se zadatak svodi na nalaženje zavisnosti ovih snaga u funkciji fazora napona i kompleksne impedanse. Kod ovog drugog scenarija, zbog razloga opštosti, nijedan od argumenata napona neće biti postavljen po faznoj osi. Razlika njihovih argumenata je promenljiva od principijelnog značaja. Ova razlika, odnosno ugao $\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2$, se često naziva i uglom snage. Kompleksna snaga \underline{S}_{12} je:

$$\underline{S}_{12} = \underline{U}_1 \underline{I}_1^* = \underline{U}_1 \left(\frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\underline{Z}} \right)^* = \frac{U_1^2}{\underline{Z}^*} - \frac{U_1 U_2^*}{\underline{Z}^*} = \frac{U_1^2}{Z} e^{j\theta_z} - \frac{U_1 U_2}{Z} e^{j\theta_z} e^{j\theta_{12}} \quad (4.108)$$

Slično se nalazi:

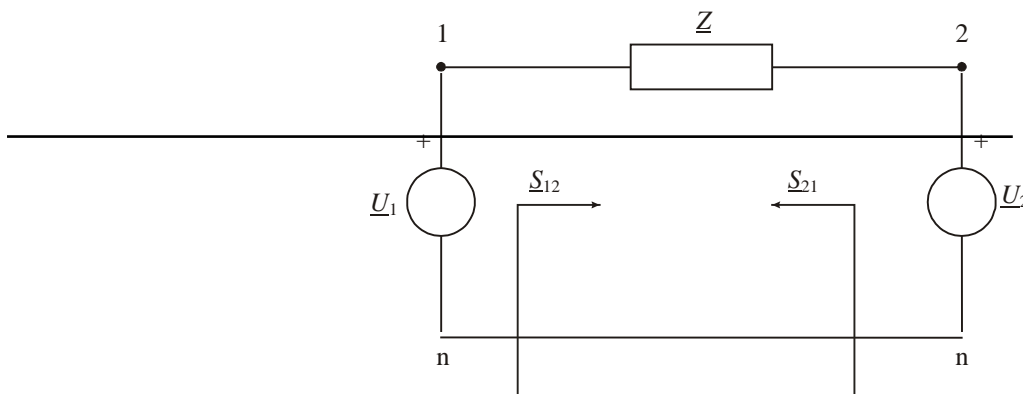
$$\underline{S}_{21} = \frac{U_2^2}{Z} e^{j\theta_z} - \frac{U_2 U_1}{Z} e^{j\theta_z} e^{-j\theta_{12}} \quad (4.109)$$

Snaga data izrazom (4.108) predstavlja snagu koja se sa predajnog kraja predaje vodu. Snaga koju prima kraj 2 je ($-\underline{S}_{21}$) i ona je:

$$-\underline{S}_{21} = -\frac{U_2^2}{Z} e^{j\theta_z} + \frac{U_2 U_1}{Z} e^{j\theta_z} e^{-j\theta_{12}} \quad (4.110)$$



Sl. 4.20 Primer dvosabirničkog sistema, aktivnog na oba kraja, povezanog kratkim vodom



Sl. 4.21 Ekvivalentna šema dvosabirničkog sistema povezanog kratkim vodom, sa sl. 4. 20

Za konstantnu impedansu kompleksna snaga koja se prenosi vodom zavisi od modula napona U_1 i U_2 i od ugla θ_{12} . Sa aspekta upravljanja ovim veličinama moduli napona su uplvisani sa regulacijom pobudne struje generatora vezanih na sabirnice 1 i 2, a ugao je određen razlikom mehaničkih snaga dovedenih na vratila generatora, odnosno razlikom uglova (određenih pozicijama) rotora. U cilju povećanja ovog ugla dovoljno je povećati dovedenu mehaničku snagu generatora 1 i smanjiti dovedenu

mehaničku snagu generatora 2. U normalnim radnim okolnostima moduli napona se menjaju u vrlo uskim granicama ($\pm 10\%$), dok se ugao može osetnije menjati. Iz tih razloga prirodno je snage prikazati kao funkcije ugla sa modulima napona i impedansama kao konstantama, pa se može pisati:

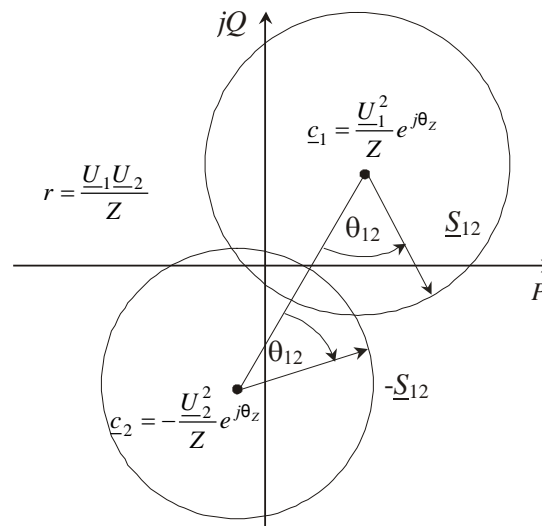
$$\underline{S}_{12} = \underline{c}_1 - \underline{c} e^{j\theta_{12}} \quad (4.111)$$

$$-\underline{S}_{21} = \underline{c}_2 + \underline{c} e^{-j\theta_{12}} \quad (4.112)$$

gde se očevidno za kompleksne konstante \underline{c}_1 , \underline{c}_2 i \underline{c} imaju sledeći izrazi:

$$\underline{c}_1 = \frac{U_1^2}{Z} e^{j\theta_z}; \underline{c}_2 = -\frac{U_2^2}{Z} e^{j\theta_z}; \underline{c} = \frac{U_1 U_2}{Z} e^{j\theta_z} \quad (4.113)$$

Za razumevanje prenosa snage po vodu korisno je nacrtati zavisnosti (4.111) i (4.112) u kompleksnoj ravni ($P; Q$). Analitički se vidi da kompleksne veličine \underline{S}_{12} i $(-\underline{S}_{21})$ opisuju krug u ovoj ravni kad se ugao θ_{12} menja. Iz ovih razloga ovi dijagrami se nazivaju kružnim dijagramima snaga. Pri tome treba ukazati da se razlikuju kružni dijagrami na predajnom kraju voda (\underline{S}_{12}) od kružnih dijagrama na prijemnom kraju voda ($-\underline{S}_{21}$). Centar krugova \underline{S}_{12} je u tački određenoj vektorom \underline{c}_1 , dok je centar krugova ($-\underline{S}_{21}$) u tački određenoj vektorom \underline{c}_2 . I jedan i drugi krug imaju isti prečnik određen sa \underline{c} . Ako je $\theta_{12} = 0$ tada su u kompleksnoj ravni vektori \underline{c}_1 i \underline{c}_2 kolinearni. Ovim su u stvari definisani svi elementi za crtanje kružnog dijagrama prikazanog na sl. 4.22.



Sl. 4.22 Kružni dijagrami snaga

Sa slike se uočava da se krugovi ne seku ako je $U_1 \neq U_2$. Dalje se vidi da kako se ugao θ_{12} povećava od nule do nekih vrednosti, aktivne snage na predajnom i prijemnom kraju rastu. Pri tome je aktivna snaga na predajnom kraju veća za gubitke aktivne snage na vodu od aktivne snage na prijemnom kraju. Sa kružnog dijagrama se vidi da je maksimalna aktivna snaga na prijemnom kraju ona koja se ima pri uglu $\theta_{12} = \theta_z$. S druge strane, maksimum aktivne snage na predajnom kraju se ima pri uglu $\theta_{12} = 180^\circ - \theta_z$. Ove granične aktivne snage zavise i od U_1, U_2 i Z . Kao što će biti naknadno pokazano videće se da neke još restriktivnije granice opredeljuju granične prenosne snage u stacionarnim stanjima.

Treba istaći da je u praktičnim analizama aktivna otpornost osetno niža od reaktanse (posebno na vodovima viših naponskih nivoa), tako da se može približno uzeti da je $Z \cong jX$. U ovakvim okolnostima nema gubitaka aktivne snage i aktivne snage na predajnom i prijemnom kraju voda su međusobno jednake. Sada se iz (4.108) i (4.109) dobija:

$$P_{12} = -P_{21} = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \theta_{12} \quad (4.114)$$

$$Q_{12} = \frac{U_1^2}{X} - \frac{U_1 U_2}{X} \cos \theta_{12} \quad (4.115a)$$

$$Q_{21} = \frac{U_2^2}{X} - \frac{U_2 U_1}{X} \cos \theta_{12} \quad (4.115b)$$

U ovom slučaju granična prenosna moć je data sa $U_1 U_2 / X$. Ako se pokuša prekoračiti ova granična prenosna snaga biće izgubljen sinhronizam između dva generatora, odnosno generatori ispadaju iz sinhronog takta i generišu snage različitim učestanosti što za posledicu ima prekomeran prenos snage i prekomerne struje na vodu koje zaštita mora da prekine.

U cilju da se podigne granična prenosna moć, odnosno da se ojača prenosna veza, mogu se ili podići moduli napona U_1 ili U_2 ili smanjiti povezna reaktansa X . Reaktansa se može smanjiti ili u fazi projektovanja (izbor konstruktivnih parametara, odnosno prelazak na konstrukciju u snopu) ili putem redne kompenzacije.

U normalnim radnim stanjima u prenosnim mrežama se ima da je $U_1 \approx U_2$, $\theta_Z \approx 90^\circ$ i θ_{12} je po pravilu do 10° . U takvim okolnostima ima se relativno dobro razdvajanje upravljanjem tokovima aktivnih i tokovima reaktivnih snaga. Tokovi aktivnih snaga su uglavnom uslovljeni uglom θ_{12} , dok su tokovi reaktivnih snaga diktirani razlikom modula napona ($U_1 - U_2$).

Od interesa je da se sada prvi scenario analizira ne preko četverokrajnika već preko jednačina injektiranja. Prvi scenario je bio slučaj kad je samo predajni kraj aktivan a prijemni kraj je pasivan. U osnovi je ovo primer radijalnog voda (čest slučaj u distributivnim mrežama). Na prijemnom kraju nalazi se pasivna potrošnja i zadatak se može formulirati kao problem nalaženja promena modula napona na prijemnom kraju sa promenama potrošnje (opterećenja). Pretpostavlja se da prijemni kraj nema ugrađene ni baterije kondenzatora koje bi pomogle održavanju modula napona na njemu. Za ilustraciju biće razmotren primer na sl. 4.23. Nadalje se pretpostavlja da potrošnja vuče izvesnu kompleksnu snagu pri konstantnom faktoru snage. Kompleksna snaga potrošnje je sada:

$$\underline{S}_p = \underline{U}_2 \underline{I}^* = U_2 e^{j\theta} I e^{-j\phi} = U_2 I (\cos \varphi + j \sin \varphi) = P_p (1 + j \tan \varphi) \quad (4.116)$$

U (4.116) reč je, kao i do sada, o trofaznoj snazi potrošnje, naponi i struje su računске veličine, a jasno je da je fazor napona na prijemnom kraju postavljen po faznoj osi, dok induktivno opterećenje čini da struja kasni za naponom za ugao φ . U cilju sagledavanja pojava vezanih za naponske probleme, zgodno je pretpostaviti da se sa variranjem opterećenja $\tan \varphi$ potrošnje uzima kao parametar. Korišćenjem relacija (4.113) i (4.115) dobija se:

$$P_p = P_{12} = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \theta_{12} \quad (4.117)$$

$$Q_p = -Q_{21} = -\frac{U_2^2}{X} + \frac{U_2 U_1}{X} \cos \theta_{12} \quad (4.118)$$

Korišćenjem identiteta $\sin^2 \theta_{12} + \cos^2 \theta_{12} = 1$ dobija se :

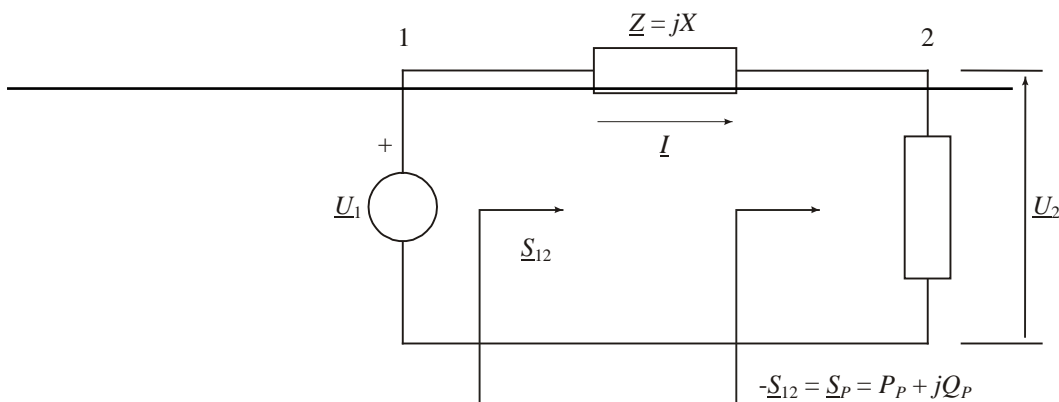
$$\left(P_p \tan \varphi + \frac{U_2^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{U_2 U_1}{X} \right)^2 - P_p^2 \quad (4.119)$$

Preuređivanjem se dobija kvadratna jednačina po U_2^2 :

$$U_2^4 + (2 P_p \tan \varphi X - U_1^2) U_2^2 + (1 + \tan^2 \varphi) P_p^2 X^2 = 0 \quad (4.120)$$

Rešenja ove jednačine su:

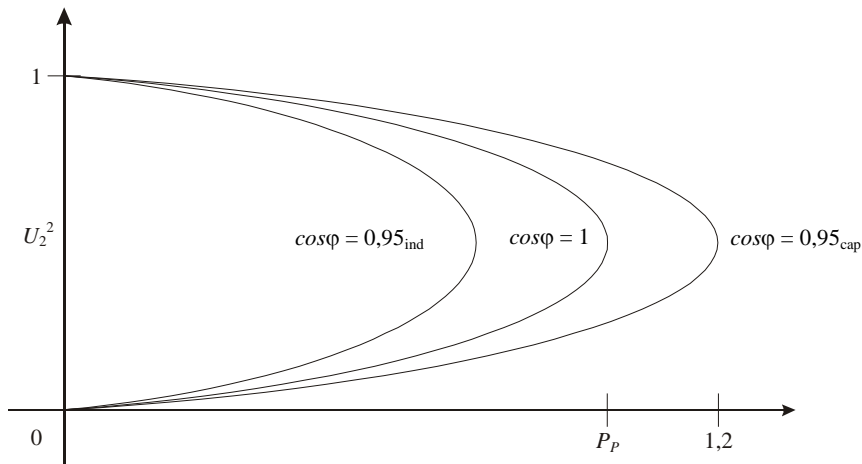
$$U_2^2 = \frac{U_1^2}{2} - P_p \tan \varphi X \pm \left[\frac{U_1^4}{4} - P_p X (P_p X + \tan \varphi U_1^2) \right]^{1/2} \quad (4.121)$$



Sl. 4.23 Ekvivalentna šema prenosna snage radijalnim kratkim vodom

Primećuju se dvostruka rešenja, odnosno činjenica da jednoj vrednosti snage potrošnje P_p na prijemnom kraju odgovaraju dve vrednosti kvadrata napona U_2^2 na tom kraju. Ova zavisnost je ilustrovana na sl. 4.24 na kojoj je kao parametar uzet $\cos \varphi$

potrošnje. Uočava se da je induktivno opterećenje povoljnije sa aspekta naponskih prilika na prijemnom kraju, odnosno da su padovi napona u takvim okolnostima manji. Međutim, u svim situacijama postoji snaga pri kojoj napon dostiže svoju kritičnu vrednost (vrhovi karakteristika) i iza ove snaga se ima pojava koja se naziva naponski slom ili naponski kolaps. Za kapacitivna opterećenja ove vrednosti kritičnih napona se dostižu za opterećenja koja su u granicama normalnih opterećenja vodova. O naponskoj stabilnosti biće više reči u delu analize koji se bavi ovim fenomenom.



Sl. 4.24 Zavisnost kvadrata napona U_2^2 od aktivne snage potrošnje P_p sa parametrom $\cos\varphi$ potrošnje

4.7.4. Bilans snaga

Od interesa je takođe izvršiti i analizu sa oba aktivna kraja, ali povezana dugim vodom. Odgovarajuća ekvivalentna šema primerena za ove proračune je π -šema voda data na sl. 4.25. Ovakvim pristupom otvara se mogućnost za uvođenje metode bilansa snaga zarad proračuna tokova aktivnih i reaktivnih snaga po granama mreže. I ovaj metod, kao i kružni dijagrami snaga, nisu od velike pomoći u analizi složenih mreža sa stotinama grana i čvorova, ali su za jednostavne šeme veoma primenljivi i gotovo nezamenljivi za razumevanje fizike problema.

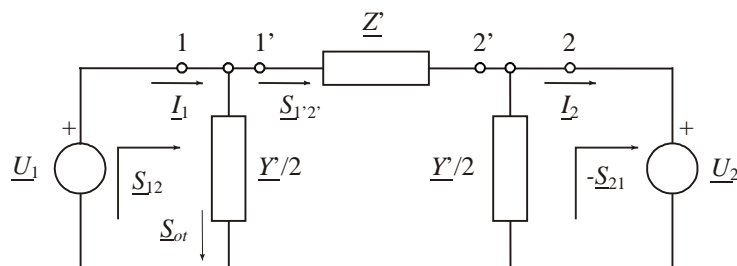
Radi nalaženja snage \underline{S}_{12} treba uočiti da je ona zbir snage otočne grane \underline{S}_{ot} (snage koju uzima otočna admitansa) i snage koja nastavlja da teče kroz rednu granu \underline{S}_{12} . Ova snaga zavisi isključivo od razlike fazora napona i struje koja teče kroz rednu impedansu, tako da se ima:

$$\underline{S}_{12} = \frac{\underline{Y}^*}{2} U_1^2 + \underline{U}_1 \left(\frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\underline{Z}'} \right)^* = \frac{\underline{Y}^*}{2} U_1^2 + \frac{U_1^2}{\underline{Z}^*} - \frac{U_1 U_2}{\underline{Z}^*} e^{j\theta_{12}} \quad (4.122)$$

Na sličan način se izračunava snaga na prijemnom kraju $-\underline{S}_{21}$. Naime bilansiranjem snaga (primenom zakona o konzervaciji snaga) uočava se da je ova snaga jednaka snazi koja dolazi iz tačke 2' umanjenoj za snagu potrošenu na otočnoj grani (na polovini admitanse voda). Na taj način se dobija:

$$-\underline{S}_{21} = \frac{-\underline{Y}^*}{2} U_2^2 - \frac{U_2^2}{\underline{Z}^*} + \frac{U_1 U_2}{\underline{Z}^*} e^{-j\theta_{12}} \quad (4.123)$$

Uočava se da se ove relacije razlikuju od relacija za kratak vod, relacije (4.108) i (4.110), samo za konstantan sabirak, određen otočnom granom voda, koji u praktičnim situacijama i nije od velikog uticaja. Kružni dijagrami snaga ostaju vrlo slični onima na sl. 4.22, samo se centri krugova pomeraju. Pošto je otočna grana gotovo čisto kapacitivnog karaktera to je pomeranje centara krugova samo po vertikali, a tokovi aktivnih snaga ostaju gotovo nepromenjeni. Fizička slika je dakle slična onoj koja se ima na kratkim vodovima samo treba očekivati mala numerička odstupanja.



Sl. 4.25 Ekvivalentna šema za analizu prenosa snage dugim vodom

4.7.5. Ograničenja prenosnih mogućnosti voda

Vodovi imaju tehnička ograničenja koja nameću granice za prenos snaga po vodu, odnosno (ne)mogućnost isporuke određene snage na predajnom kraju voda. Od ovih ograničenja u praksi se razmatraju ograničenja nametnuta padom napona, termičkom granicom i granicom stabilnosti. Ograničenje nametnuto padom napona je diktirano dopuštenim padovima napona koja su tipično do 10%. Ova ograničenja su od interesa za prenos velikih snaga na velika rastojanja. Termička granica je diktirana fizičkim karakteristikama provodnika i pripadajućih delova provodnika. Proticanje struje kroz provodnike je uzročnik generisanja toplote Joulovim efektom. Ovi gubici aktivne snage smanjuju efikasnost prenosa snage i ovaj fenomen se može uvažavati kroz koeficijent korisnog dejstva voda. S druge strane proizvedena toplota uzrokuje porast temperature provodnika (na nadzemnim vodovima reč je o Al-Fe užadi). Porast temperature je ograničen s tri strane. Pre svega postepen gubitak mehaničke čvrstoće provodnika (nereverzibilne promene) usled dugotrajnog izlaganja prekomernim temperaturama se javlja za temperature iznad 127 °C (za provodnike sa visokim sadržajem aluminijuma) i za temperature iznad 150 °C, za ostale provodnike. Zatim, pri visokim temperaturama je ugib provodnika odnosno njegovo približavanje zemlji i objektima povećano i mora se striktno držati u granicama koje diktiraju propisi i konačno, temperatura kapanja neutralne masti kojom se štite Al-Fe užad od korozije (zaštita čeličnog jezgra) je isto tako ograničenje koje može da bude ugroženo. Starije tehnologije neutralnih masti imale su relativno niske temperature kapanja (ispod 100 °C) ali danas se raspolaze sa neutralnim mastima sa osetno višim temperaturama kapanja. U većini praktičnih situacija ugib provodnika je ograničavajući faktor sa aspekta maksimalno dozvoljenih temperatura provodnika. U svakom slučaju termička granica uslovljava ograničavanje struja koje teku kroz provodnike, odnosno nameće uvođenje trajno dopuštenih struja na vodovima. Vodovi imaju svoje pridružene trajno dopuštene struje koje su funkcija temperature okoline, brzine vetra i ostalih uslova na vodu, a posebno su diktirane geometrijom voda (konstrukcije u snopu imaju prednosti kod odvođenja toplote zbog uvećane površine hlađenja). Dakle, siguran pogon nadzemnih vodova zahteva ograničavanje maksimalnih radnih temperatura vodova, odnosno uslovljava trajno dopuštena strujna opterećenja.

Sa gledišta kratkotrajno dopuštenih preopterećenja situacija je diktirana vremenskim konstantama provodnika nadzemnih vodova. Ove konstante iznose nekoliko desetina minuta (tipično između 10 i 20 minuta) i pošto se stacionarna stanja dostižu za nešto više od tri vremenske konstante to se vidi da je manevarski prostor za dispečerske akcije u realnom vremenu u pogledu preopterećenja između 30 i 60 minuta. Iz ovih razloga se pravi razlika između trajno dopuštenih opterećenja i kratkotrajno dopuštenih preopterećenja.

Takođe je važno ukazati da su vodovi projektovani i izvedeni za određene (nominalne) naponske nivoe. Izbor preseka provodnika, geometrije provodnika, rastojanja između faza i odgovarajuće izolacije je uslovljeno naponskim nivoom. Pored toga vodovi u normalnom pogonu rade sa naponima koji su u relativno uskim granicama oko nominalnog napona, u cilju da se i na potrošačkom nivou ostvare naponi sa malim odstupanjima od nominalnih napona (kvalitet napona).

Sa ograničenjima nametnutim na maksimalne napone i struje sledi odgovarajuće ograničenje na njihov proizvod a to je prividna snaga koja može da se prenosi sa zahtevanim performansama sigurnosti. Ovo je ograničenje nametnuto na prividnu snagu (MVA), tako da se pri lošijim faktorima snage imaju restriktivnije granice na prenos aktivne snage.

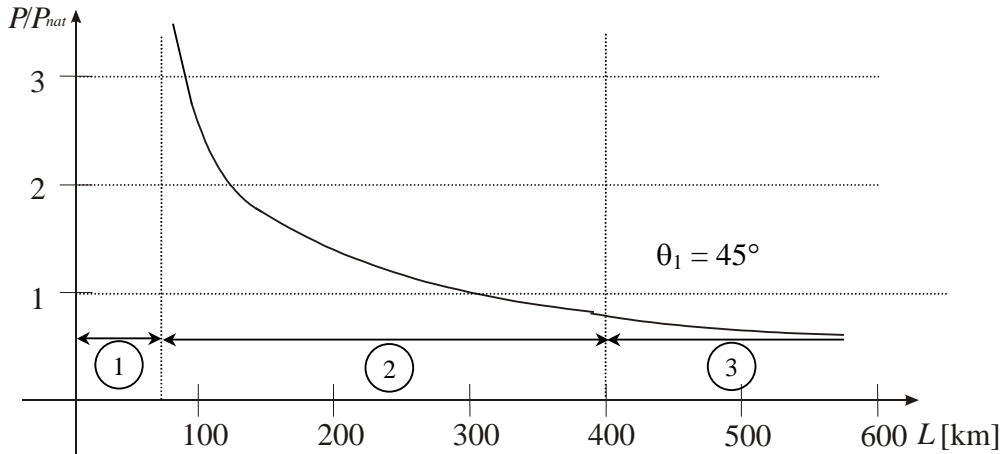
Važno je takođe ukazati da ograničenja na prenos maksimalne snage vodom mogu biti manje restriktivna nego ograničenja koja diktiraju ostali elementi u sistemu. Tako transformator u termičkom pogledu često biva usko grlo u rednoj vezi.

Granica stabilnosti, koja je u prethodnim pojednostavljenim analizama idealizovano konstatovana da iznosi 90° u praksi se mora držati do vrednosti između 40° i 50° u cilju sigurnog održavanja sinhronizma u pogonu.

Imajući u vidu prethodna razmatranja lako se zaključuje da je za kratke vodove termička granica najrestriktivnija, dok je za dugačke vodove granica stabilnosti ta do koje se prvo stiže. Ovo je ilustrovano na sl. 4.26 na kojoj se kvalitativno uočavaju baš ove zakonitosti.

Koncept opteretljivosti vodova je koristan u smislu razumevanja prenosnih mogućnosti vodova uslovljenih dužinom vodova i njihovim naponskim nivoom. Opteretljivost voda se određuje kao relativna mera dopuštene opterećenosti voda u odnosu na prirodnu snagu voda za zadatu termičku granicu, granicu u pogledu pada napona i granicu u pogledu naponske stabilnosti. Na sl. 4.26 prikazana je opšta karakteristika opteretljivosti vodova za slučaj nadzemnih nekompenzovanih vodova koja je validna za sve naponske nivoe. Kriva pokazuje granične vrednosti snaga koje se mogu preneti kao funkcije dužine voda. Pretpostavljeno je da maksimalno dopušteni pad napona iznosi 5%, i da je minimalna rezerva u statičkoj stabilnosti 30% (koja odgovara uglu od 44° koji se dobija kao vrednost od $\arcsin(0,7)$). Izračunavanje granice statičke stabilnosti podrazumeva vod čija su oba kraja aktivna i ekvivalentirana odgovarajućim reaktansama.

Na vodovima visokih napona aktivne otpornosti su gotovo zanemarive u odnosu na reaktanse tako da se ovi vodovi ponašaju blisko idealizovanim vodovima. Pošto je električna ugaona dužina praktično ista za sve ovakve vodove to se zaključuje da je ova kriva primenljiva za sve naponske nivoe (visoki i vrlo visoki naponi).



Sl. 4.26 Granične prenosne mogućnosti vodova diktirane termičkom granicom i granicom stabilnosti

Kao što se sa slike vidi opteretljivost je diktirana sa termičkom granicom za vodove duge do 80 km (zona 1), sa granicom u pogledu pada napona za vodove dužina od 80 km do 400 km (zona 2), i konačno sa granicom stabilnosti za vodove duže od 400 km (zona 3). Interesantno je uočiti da za vodove duže od 480 km opteretljivost postaje manja od prirodne snage voda.

Ovako predstavljena kriva pruža mogućnost orijentacionog planiranja opteretljivosti i pruža dobru osnovu za sagledavanje fizike problema. Treba ukazati da se kod preciznog definisanja opteretljivosti vodova u složenim sistemima i drugi faktori moraju uvažavati.

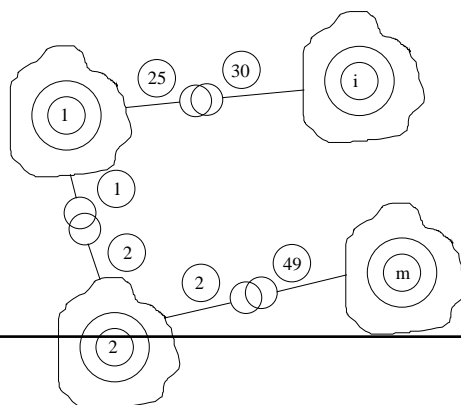
4.8. Metod svedenih veličina

U dosadašnjim izlaganjima stvarne fizičke veličine u sistemu podeljene su na radne (režimske) veličine i na parametre. Radne veličine su naponi, struje, snage i uglovi (fazni stavovi) a parametri su rezistanse, reaktanse, konduktanse i susceptanse pojedinih elemenata. Pored stvarnih veličina uvedene su i relativne (jedinične, *p.u.*) veličine koje se relativno lako interpretiraju i kao procentualne veličine. U analizi se takođe radi i sa svedenim veličinama u smislu da su svedene veličine preračunate na jedan (usvojeni) naponski nivo i one će biti iskorišćene u narednom izlaganju.

Treba još jednom ukazati da nazivne (nominalne) veličine, tj. veličine za koje je neki element ili uređaj kontruisan i izveden mogu u nekim stanjima i na nekim lokacijama u sistemu da budu jednake radnim veličinama. U principu ova podudarnost je slučajnog a ne opšteg karaktera.

Kod metoda svedenih veličina analizirani EES se predstavlja sa svim svojim elementima (na svim naponskim nivoima) zajedno sa interkonektivnim transformatorima koji povezuju mreže, ili delove mreža, različitih naponskih nivoa, sl. 4.27.

U prvom koraku bira se deo mreže na čiji naponski nivo će se izvršiti svođenje. Neka je to podsistem 1 čiji je usvojeni bazni napon U_{B1} (U_{B1} može biti nominalni napon datog dela mreže ili bilo koji proizvoljan napon).



Sl. 4.27 Podsistemi u EES

Sa sl. 4.27 se vidi da je podsistem 1 povezan sa podsistemima 2 i i tako da se svođenjem na U_{B1} dobija:

$$\frac{U_{B1}}{U_{B2}} = m_{1,2} \Rightarrow U_{B2} = \frac{U_{B1}}{m_{1,2}} = U_{B1} m_{2,1}$$

$$\frac{U_{B1}}{U_{Bi}} = m_{25,30} \Rightarrow U_{Bi} = \frac{U_{B1}}{m_{25,30}} = U_{B1} m_{30,25}$$

Pri svođenju, snage ostaju invarijantne (svedene snage jednake stvarnim snagama), tako da se odnosi svedenih i stvarnih veličina pojedinih elemenata i delova sistema izražavaju preko količnika njihovih baznih napona:

$$\begin{aligned}\underline{S}^{sv} &= \underline{S} \\ \underline{U}_i^{sv} &= \underline{U}_i \frac{U_{B1}}{U_{Bi}} & \underline{U}_i &= \underline{U}_i^{sv} \frac{U_{Bi}}{U_{B1}} \\ \underline{I}_i^{sv} &= \underline{I}_i \frac{I_{Bi}}{I_{B1}} & \underline{I}_i &= \underline{I}_i^{sv} \frac{U_{B1}}{U_{Bi}} \\ \underline{U}_i^{sv} \underline{I}_i^{*sv} &= \underline{U}_i \frac{U_{B1}}{U_{Bi}} \underline{I}_i^* \frac{I_{Bi}}{I_{B1}} = \underline{U}_i \underline{I}_i^*\end{aligned}$$

Ovim je pokazano da je snaga invarijantna. Za impedanse i admitanse se dalje dobija:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_i^{sv} &= \frac{\left(\underline{U}_i^{sv}\right)^2}{\underline{S}_i} = U_i^2 \left(\frac{U_{B1}}{U_{Bi}}\right)^2 \frac{1}{S_i} = \underline{Z}_i \left(\frac{U_{B1}}{U_{Bi}}\right)^2 \\ \underline{Y}_i^{sv} &= Y_i \left(\frac{U_{Bi}}{U_{B1}}\right)^2\end{aligned}$$

Svođenje se može izvršiti i na neki zamišljeni naponski nivo koji ne postoji u mreži ali je prethodni postupak pogodniji jer neke od veličina ostaju iste. Ako se unapred ne znaju tačni odnosi transformacije onda se može uzeti da je to odnos nominalnih napona mreže.

Sam postupak svođenja je nešto složeniji za slučaj kad se imaju regulacioni transformatori. U principu moguće je postupiti na dva načina:

I - Za prenosne odnose koji ne odgovaraju nominalnim, proračunavaju se novi odnosi baznih napona delova mreža i nove svedene impedanse i naponi pa se dalje proračuni vrše kao što je to slučaj sa transformatorima sa stalnim odnosom transformacije.

II - Zadrže se sve izračunate vrednosti impedansi i napona, pri čemu se novi prenosni odnosi regulacionih transformatora unose preko idealnih transformatora umetnutih u grane mreže gde se nalaze regulacioni transformatori kod kojih se promenio prenosni odnos.

Prethodna analiza je primenljiva na radijalne mreže. Kod petljastih mreža mogu se razlikovati dva slučaja:

I - Slučaj kada je proizvod svih prenosnih odnosa po zatvorenoj konturi (petlji) jednak jedinici (obično se kaže da se petlja zatvara). Proračun je sličan proračunu radijalnih mreža s tim što se mora primeniti neka od metoda za rešavanje složenih mreža.

II - Slučaj kada je proizvod prenosnih odnosa transformacije po zatvorenoj konturi (petlji) različit od jedan (petlja se ne zatvara). U ovakvim okolnostima neophodno je uvažiti stvarne odnose transformacije. Proračuni stacionarnih stanja se vrše tako da što se petlja otvori, pa se na mestu prekida posmatra idealan prazan hod mreže tako što se postavlja idealan transformator. Otvaranje petlje se vrši na proizvoljnom mestu i ne zavisi od broja i položaja transformatora u petlji. Dovoljno je da se petlja otvori na bilo kom mestu, i to jednom, a prenosni odnos idealnog transformatora je takav da obezbeđuje da proizvod prenosnih odnosa u tako zatvorenoj petlji bude jedan, odnosno obezbeđuje zatvaranje petlje. Kod ovakvih problema posebno je važan efekat poprečne komponente pada napona koja u kolu relativno niske impedanse može da proizvede velike struje cirkulacije.

5. Kompenzacija reaktivnih snaga u EES

Pojam reaktivne snage je tesno vezan za samu prirodu pojava pri naizmjeničnom prenosu električne energije. Induktivni i kapacitivni elementi u EES troše, odnosno generišu, reaktivnu snagu, baš kao što aktivna otpornost troši aktivnu snagu. Dok je fenomen vezan sa aktivnom snagom lako merljiv i fizički blizak (aktivna električna energija se direktno ekvivalentira sa toplotnom energijom kroz pojavu poznatu kao Joule-ov efekat), dotle su fenomeni reaktivne snage vezani za energiju električnog i magnetnog polja i u tom smislu nešto apstraktniji. Reaktivna snaga se može interpretirati kao srednja brzina kojom se energija izvora predaje reaktivnim elementima kroz reverzibilni proces akumulisanja energije magnetnog i/ili električnog polja.

Elementi EES sadrže reaktivne parametre, induktivnosti i kapacitivnosti, pa prenos električne energije naizmjeničnom strujom podrazumeva postojanje električnog i magnetnog polja, odnosno reaktivne fenomene. Pojednostavljeno se može rezonovati, kao što je to diskutovano u delu 4.4, da je prenos aktivnih snaga po dalekovodu u osnovi određen faznom razlikom fazora napona na predajnom i prijemnom kraju a da je prenos reaktivnih snaga uslovljen razlikom modula napona. Prema tome, može se govoriti o dve gotovo raspregnute (dekuplovane) regulacione konture u EES, $P-\theta$ (aktivna snaga – uglovi) regulaciona kontura i $Q-U$ (reaktivna snaga – naponi) regulaciona kontura, jer pojave u jednoj, relativno slabo utiču na pojave u drugoj konturi. U skladu s prethodnim upravljanje naponskim prilikama u EES-u, odnosno kontrola napona u dopuštenim granicama, ostvaruje se u najvećoj meri preko regulisanja proizvodnje i potrošnje reaktivne snage.

Regulacija napona se u počecima razvoja prenosnih i distributivnih sistema po pravilu vršila samo na generatoru, regulisanjem pobude, ali je slabost ovog koncepta brzo uočena jer on zahteva prenos reaktivne snage kroz mrežu koji za posledice ima:

- povećane padove napona,
- povećane gubitke aktivnih snaga i
- povećane dimenzije (kapacitete) elemenata sistema.

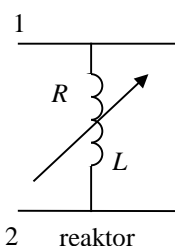
O slabostima koje prouzrokuju povećani tokovi snaga kroz mrežu biće više reči kasnije.

5.1. Uređaji za kompenzaciju reaktivnih snaga i za regulaciju napona

Uređaji za proizvodnju/potrošnju reaktivnih snaga su sredstva kojima se generiše odnosno apsorbuje reaktivna snaga. Prema formalnoj konvenciji, prema kojoj se struja konjuguje kod izračunavanja kompleksne snage, induktivnost se u elektroenergetskim mrežama ponaša kao potrošač, a kapacitivnost se ponaša kao izvor reaktivne induktivne snage.

U uređaje za proizvodnju, odnosno za potrošnju reaktivnih snaga spadaju: sinhroni generatori, sinhroni kompenzatori, sinhroni motori, otočni i redni kondenzatori, linearni i zasićeni reaktori kao i statički kompenzacioni sistemi.

Pored ovih uređaja u EES postoje i sredstva za preraspodelu reaktivnih snaga. Ovde se ubrajaju regulacioni transformatori, redni kondenzatori i reaktori.



Sl. 5.1 Prikaz reaktora u EES

Natpobuđeni sinhroni generator daje, a potpobuđeni uzima reaktivnu snagu iz mreže. S obzirom na svoju veličinu i značaj u sistemima sinhroni generatori predstavljaju glavni izvor reaktivnih snaga, posebno ako su bliže centrima potrošnje, što je često slučaj sa turbogeneratorima. Mogućnosti proizvodnje, odnosno potrošnje reaktivne snage sinhronih generatora određene su pogonskim dijagramom kojim se ograničenja nametnuta dozvoljenim zagrevanjima preslikavaju na granične vrednosti aktivnih i reaktivnih snaga (napona) kroz međusobnu uslovljenost. Rad generatora u potpobuđenom režimu je ipak prinudni režim rada tako da se u pogonskim uslovima izbegava. Sinhroni kompenzator je u osnovi sinhroni motor koji, kao idealizovan uređaj, niti daje niti uzima aktivnu snagu iz mreže, odnosno u takvim okolnostima ova idealizovana mašina ima bilans aktivnih snaga jednak nuli. Dakle, sinhronim kompenzatorom se u osnovi utiče samo na injektiranje reaktivnih snaga u mreži preko podešavanja pobudne struje i njihova primena u sistemu je upravo i određena izraženim potrebama za regulacijom reaktivnih snaga (naponskih prilika). Pošto su kao rotacione mašine ipak prilično skupi (sa aspekta jedinične cene kVAr) to njihova ugradnja mora biti detaljno opravdana tehničko – ekonomskom analizom. Sinhroni motori se koriste u nekim industrijskim pogonima i tada predstavljaju dragocen reaktivni resurs. Međutim, njihova primena je retka tako da na sistemskom nivou nisu od većeg uticaja. Reaktor je prigušnica, prikazana na sl. 5.1, sa promenljivom induktivnošću L (čija je relativno mala aktivna otpornost označena sa R), koja se konstruktivno može realizovati bez gvođenog jezgra (linearni reaktor) ili sa gvođenim jezgrom. Promenljiva induktivnost se realizuje putem mehaničkog prekidanja pojedinih stepeni prebacivanjem sa odvojka na odvojak. Idealni reaktor bio bi bez aktivne otpornosti, međutim u praktičnim realizacijama ona se ne može izbeći kako je to i naznačeno na istoj slici. Reaktori se u

elektroenergetskim mrežama vezuju ili otočno (sl. 5.1) ili redno. Otočnim vezivanjem (tačka 2 sa sl. 5.1 je tada na potencijalu zemlje) omogućuje se da se viškovi reaktivnih snaga u sistemu apsorbiraju u reaktoru. Ako se reaktor vezuje redno, (kada su tačke 1 i 2 na radnom potencijalu), tada obično služi za ograničavanje struja kratkog spoja. Regulacionom transformatoru se može menjati prenosni odnos, pod opterećenjem ili bez opterećenja, i tako uticati na naponske prilike u mreži, kako je to već diskutovano u prethodnim poglavljima. S obzirom na značaj i snagu regulacionih transformatora u sistemu oni predstavljaju, iza sinhronih generatora, drugi po važnosti reaktivni regulacioni resurs. Statički kompenzacioni sistemi se sve više primenjuju u savremenoj praksi i to kako u industrijskim pogonima tako i u mrežama visokih napona. Naime, zahvaljujući napretku energetske elektronike tiristori kontrolisani reaktori, tiristori kontrolisane kapacitivnosti, reaktori kontrolisani jednosmernom strujom i reaktori sa samozasićenjem predstavljaju resurse iz kojih se upravljanje reaktivnim potrebama može vrlo uspešno da rešava. Posebno je naglašena potreba za ovakvim uređajima u mrežama sa višim harmonicima i brzopromenljivim režimima rada, kada oni, posebno podešeni za takve potrebe, vrše i ulogu filtriranja viših harmonika.

5.2. Otočna kompenzacija

Pošto se i danas u praksi najčešće sreće otočna kompenzacija reaktivnih snaga, to će iz tih razloga ona prva biti i analizirana. Ideja otočne kompenzacije reaktivne snage u distributivnim mrežama, gde se dominantno upotrebljava, biće objašnjena na primeru potrošačkog područja sa aktivnim opterećenjem P_p i vrlo uticajnim induktivnim opterećenjem Q_p , prikazanim na sl. 5.2. Ovo je tipičan primer kompenzacije reaktivne snage u distributivnim mrežama, koji se još uvek dominantno koristi pri sadašnjem razvoju tehnologije. Na ovoj šemi T_1 je regulacioni transformator pod opterećenjem koji održava modul napona \underline{U}_1 konstantnim. Sabirnice 2 su potrošačke sabirnice. Za dalju analizu važno je uočiti dva karakteristična stacionarna stanja za šemu na sl. 5.2 i to stanja koja će formalno biti obeležena sa I i II. Stanje I predstavlja stanje pre uključivanja baterije kondenzatora, a stanje II predstavlja stanje nakon uključivanja baterije. Fizička veličina koja u oba ova stanja ostaje nepromenjena (inerciona koordinata) jeste modul napona na sabirnicama 1. Već ovde treba ukazati da se potrebe za ugradnjom baterija kondenzatora osim tehničkim, mogu opravdati i ekonomskim razlozima. Grubo se može smatrati, a što je u skladu sa većinom tarifnih sistema koji delom regulišu ekonomsku motivisanost za ovom ugradnjom, da se potrebe za ugradnjom baterija kondenzatora, sa aspekta ekonomskih kriterijuma koje diktira tarifni sistem, imaju ukoliko je $\cos\varphi_p \leq 0,95$. Treba uočiti da se pri ovom faktoru snage ima sledeća veza između reaktivne i aktivne snage potrošnje: $Q_p = P_p/3$.

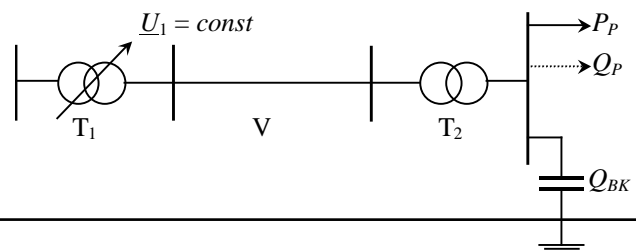
Pre priključenja baterije kondenzatora na sabirnice 2 (stanje I) važi sledeća naponska jednačina:

$$U_1 = U_2 + \Delta U_2 + j\delta U_2 \quad (5.1)$$

Ako se, kao što je to u većini proračuna u distributivnim mrežama dopustivo, zanemari poprečna komponenta pada napona, tada naponi \underline{U}_1 i \underline{U}_2 imaju isti fazni stav i proračuni se svode samo na izračunavanja razlike njihovih modula. Korisno je, zbog konciznijeg proračuna, uvesti ukupnu aktivnu i ukupnu reaktivnu otpornost šeme sa sl.5.2:

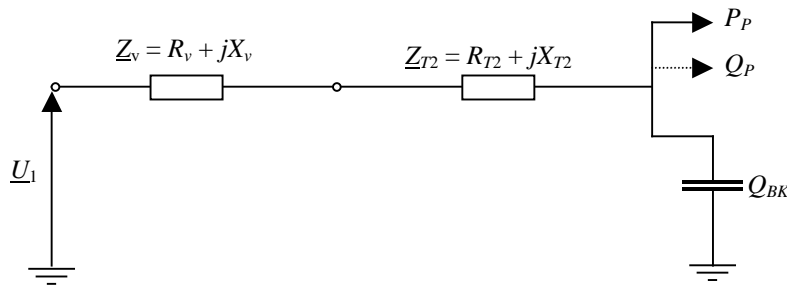
$$\begin{aligned} \Sigma R &= R_v + R_{T2} \\ \Sigma X &= X_v + X_{T2} \end{aligned}$$

U nastavku analize otočne grane voda i transformatora T_2 biće zanemarene, što je u distributivnim mrežama po pravilu korektno aproksimacija.



Sl. 5.2 Otočna kompenzacija reaktivnih snaga u distributivnoj mreži

Na osnovu uvedenih zanemarenja odgovarajuća ekvivalentna šema radijalnog, distributivnog sistema sa sl. 5.2, prikazana je na sl. 5.3.



Sl. 5.3 Ekvivalentna šema radijalnog distributivnog sistema

Stanje I, odnosno stanje pre priključenja baterije kondenzatora, određeno je dakle, uz zanemarenu poprečnu komponentu, sledećom vezom:

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_2 = U_2 + \frac{P_P \sum R + Q_P \sum X}{U_2} \quad (5.2)$$

Posle priključenja baterije kondenzatora sa instalisanom snagom Q_{BK} (stanje II), a bez uvažavanja promena u aktivnoj i reaktivnoj snazi potrošnje usled promene modula napona na sabirnicama 2, ima se sledeća naponska relacija:

$$U_1 = U_2 + \Delta U_2^{spec} + \frac{P_P \sum R + (Q_P - Q_{BK}) \sum X}{U_2 + \Delta U_2^{spec}} \quad (5.3)$$

Ako se prethodne dve jednačine povežu tako da se izjednače desne strane (pošto su leve strane jednake jer je u pitanju konstantan modul napona, koji je inerciona koordinata) tada se kao jedina nepoznata veličina pojavljuje instalisana snaga baterije kondenzatora Q_{BK} i rešava se jednostavno iz tako dobijene linearne veze. Treba ukazati da je sa ΔU_2^{spec} obeležena specificirana, zadata popravka napona potrebna da bi se na potrošačkim sabirnicama 2 postigao unapred zadati (željeni) nivo napona.

Prethodna analiza je pojednostavljena u smislu pretpostavke da se aktivna i reaktivna snaga potrošnje na sabirnicama 2 ne menjaju pri prelasku iz jednog stanja u drugo. S obzirom na to da se u stvarnosti na sabirnicama 2 menja napon, to se onda menjaju i snage potrošačkog područja u skladu sa statičkim naponskim karakteristikama potrošnje (analizirano u poglavlju 3.), a što se matematički prikazuje kao:

$$\begin{aligned} P_P &= P_{P0} + \Delta P_P \\ Q_P &= Q_{P0} + \Delta Q_P \end{aligned} \quad (5.4)$$

U (5.4) je sa P_{P0} i Q_{P0} određena radna tačka koja odgovara stanju pre priključenja baterije kondenzatora. Iz prethodnih relacija nalazi se sada priraštaj aktivne, odnosno reaktivne snage sa specificiranom promenom napona ΔU_2^{spec} , a uz pretpostavku da je učestanost konstantna:

$$\Delta P_P = k_{PU} \frac{P_{P0}}{U_0} \Delta U_2^{spec} \quad (5.5)$$

$$\Delta Q_P = k_{QU} \frac{Q_{P0}}{U_0} \Delta U_2^{spec}$$

Statički koeficijenti promene aktivne i reaktivne snage sa naponom mogu se orijentaciono uzeti da iznose, kao što je diskutovano u poglavlju 3.

$k_{PU} = 1,1 \div 1,3$ (a kod industrijskih pogona oko 0,8) i $k_{QU} = 1,6 \div 1,9$.

Stanje II se sada može preciznije da iskaže sledećom relacijom:

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_2^{spec} + \frac{(P_P + \Delta P_P) \sum R + (Q_P + \Delta Q_P - Q_{BK}) \sum X}{U_2 + \Delta U_2^{spec}} \quad (5.6)$$

I u prethodnoj relaciji kao nepoznata obično se posmatra samo reaktivna snaga, koju treba proizvesti sa baterijama kondenzatora, da bi se ostvarili željeni efekti popravke napona.

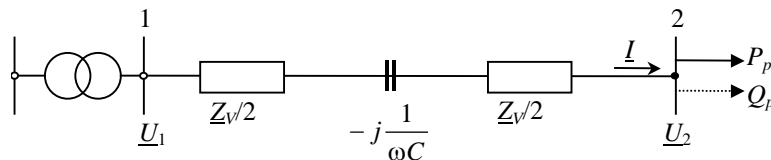
Pošto je po prirodi stvari snaga baterije kondenzatora funkcija napona, $Q_{BK} = f(U_2)$, to se zaključuje da baterije kondenzatora vezane otočno na sabirnice distributivnih postrojenja imaju tzv. negativni efekat samoregulacije. Naime, zahtev sistema je da baterije kondenzatora generišu više reaktivne snage pri nižim (lošijim) naponima, a slučaj je upravo suprotan, kako se to vidi iz sledeće elementarne veze:

$$Q_{BK} = (\omega C)U_2^2 \quad (5.7)$$

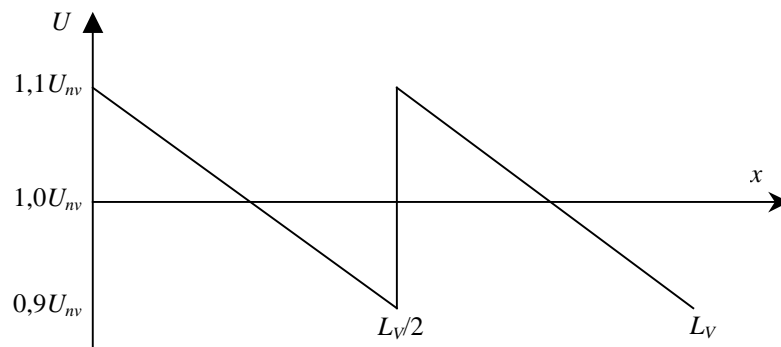
Na osnovu prethodnog se vidi da baterija kondenzatora, sa promenama radnog napona, sama sebe negativno (nepovoljno) reguliše u funkciji tih promena i to je, naravno, jedna od negativnih osobina otočnih baterija. Drugačije rečeno, otočne baterije kondenzatora daju pri višim radnim naponima više reaktivne snage, a upravo obrnuto je poželjno u pogonu.

5.3. Redna kompenzacija

Ako se baterije kondenzatora vezuju na red sa elementima voda, odnosno sa samim vodom, tada one smanjuju rezultatnu induktivnu reaktansu. Na sl. 5.4a je pretpostavljeno da je redna baterija kondenzatora instalirana na sredini distributivnog voda dužine L_v , koji je ekvivalentiran samo sa svojom impedansom redne grane Z_v . Ova impedansa je podeljena na dve polovine između kojih je locirana kapacitivna reaktansa X_C .



Sl. 5.4a Primena redne kompenzacije u distributivnim mrežama



Sl. 5.4b Ilustracija skokovite promene napona kod redne kompenzacije

Lokacija redne baterije kondenzatora na vodu nije od bitnijeg uticaja na efekat kompenzacije (induktivnih) parametara voda. Ako se pad napona na vodu izrazi bez uticaja poprečne komponente pada napona (a što je u distributivnim mrežama korektno zanemarenje), tada se dobija:

$$\Delta U = \frac{P_p R_v + Q_p (X_v - X_C)}{U_2} \quad (5.8)$$

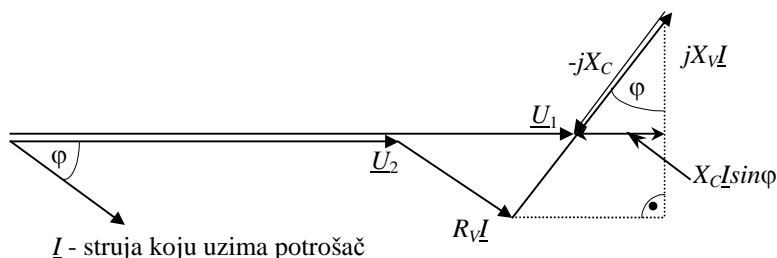
U formuli (5.8) sa ΔU je označena podužna komponenta pada napona, sa X_v ukupna reaktansa voda i sa X_C reaktansa redne baterije kondenzatora koja se izračunava kao:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (5.9)$$

Sa C je u prethodnoj relaciji označena ukupna kapacitivnost redne baterije kondenzatora. Najbolji rezultati sa rednom kompenzacijom se postižu na radijalnim distributivnim vodovima sa relativno lošim $\cos\varphi$ (npr. od 0,7 do 0,9). Dejstvo rednog kondenzatora se najviše oseća iza mesta njegovog postavljanja (posmatrano u smislu proticanja energije). Popravka (korekcija) faktora snage je lošija nego kod otočne kompenzacije i ona se svodi na proizvodnju onog iznosa reaktivne snage kojeg zahtevaju potrošači koji su priključeni na sabirnice 2. Suštinska posledica primene redne kompenzacije jeste da se sa njom utiče na parametre voda, odnosno da se ugradnjom rednog kondenzatora vrši smanjivanje ukupne (induktivne) reaktanse. Primena redne kompenzacije je u prošlosti bila dominantna u prenosnim mrežama, jer se pomoću nje efikasno povećava prenosna moć dalekovoda i granica stabilnosti. Naime, prenos snage kroz vod je obrnuto srazmeran sa ukupnom reaktansom voda. Pošto se kod redne kompenzacije ukupna reaktansa smanjuje, to se povećava maksimalna prenosna snaga voda. Isto tako sve se ima kao da je prirodna snaga uvećana jer je efektivna (redna) induktivnost smanjena.

Međutim, u poslednje vreme, zahvaljujući savremenim tehnološkim unapređenjima, osetno je povećano korišćenje redne kompenzacije i u distributivnim mrežama. Za ilustraciju redne kompenzacije biće iskorišćena sl. 5.4a, na kojoj se pretpostavlja da je rezultatni odziv potrošačkog centra induktivan, tako da je struja potrošnje I na sabirnicama 2 induktivnog karaktera. Praktični slučajevi kada se nameće primena (redne ili otočne) kompenzacije vezani su za radijalni pogon jako opterećenog voda sa lošim faktorom snage. Menjanjem instalisane snage redne baterije menja se fazorski dijagram na sl. 5.5 i

pozitivni efekti redne kompenzacije lako se uočavaju (popravka naponskih prilika, povećani kapaciteti za prenos aktivne snage i smanjenje gubitaka snage).



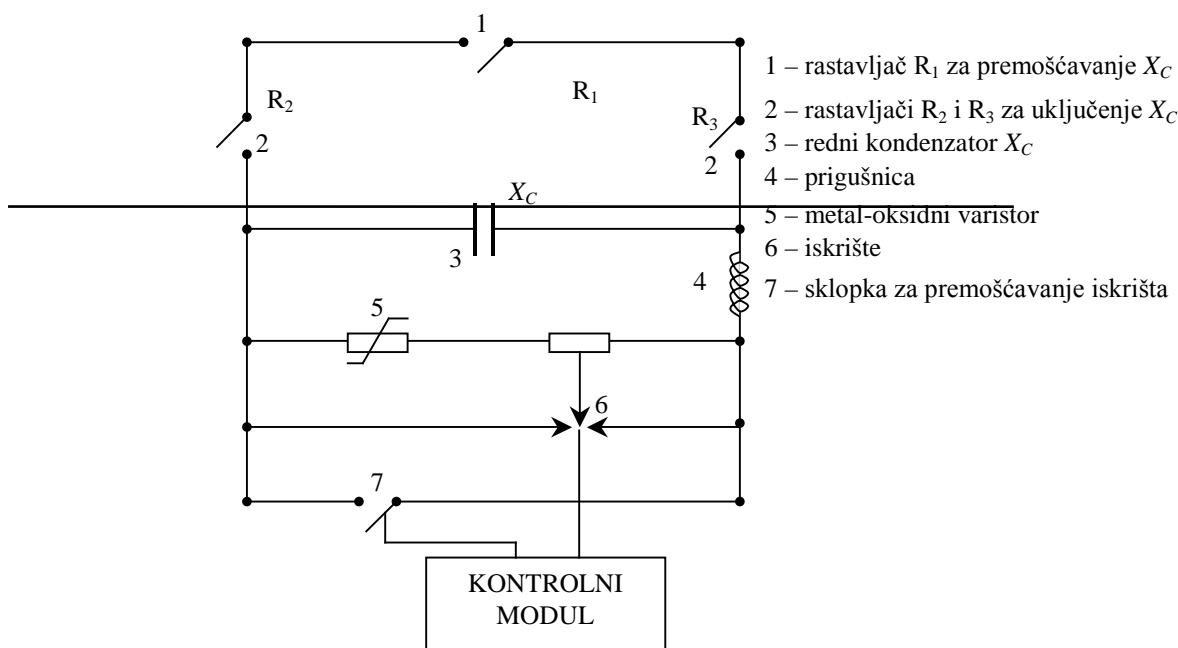
Sl. 5.5 Fazorski dijagram koji odgovara rednoj kompenzaciji

U distributivnim mrežama po pravilu je pad napona $R_v I$ znatno manji od pada napona $X_v I$. Ako se pretpostavi granični slučaj, odnosno da je pad napona na aktivnoj otpornosti zanemariv, $R_v I \cong 0$, i ako se dalje pretpostavi da važi da je $X_v = X_c$, tada se sa fazorskog dijagrama vidi da nema pada napona na vodu. To je slučaj potpune, odnosno idealne kompenzacije pri kojoj su moduli napona na početku i kraju voda međusobno jednaki, $U_1 = U_2$.

Efekti redne kompenzacije su bolji kod vodova kod kojih je odnos X / R veći. Važno je ukazati da odnos $(X_c / X_v)\%$ pokazuje procenat kompenzacije reaktanse voda. Pad napona na rednoj bateriji kondenzatora je $I X_c$. Popravka napona, odnosno skokovito povećanje napona, do koga dolazi na mestu ugradnje redne baterije kondenzatora, sl. 5.4b, proporcionalna je sa strujom (opterećenjem) u svakom trenutku. Na taj se način rednom kompenzacijom vrši samoregulacija napona, odnosno smanjuju se varijacije napona koje bi se normalno imale pri promenljivom dijagramu opterećenja. U normalnom radnom režimu pad napona na rednoj bateriji je mali. Problem se javlja u režimima kratkog spoja, kada kroz bateriju teče struja kratkog spoja (u slučaju trofaznog kratkog spoja ta struja je I_{k3}), koja je tipično za red veličine veća od struje u normalnim radnim režimima. Tada je pad napona na bateriji $I_{k3} X_c$ i pošto je on visok od tih (pre)napona mogu da stradaju baterije kondenzatora koje su i naponski i strujno osetljive.

Glavna slabost rednih baterija se ispoljavala, baš kako je i opisano, upravo za vreme trajanja kratkog spoja, odnosno prilikom proticanja struje kratkog spoja kroz rednu bateriju. Da bi se ovi neželjeni prenaponi pri kratkom spoju sprečili savremena rešenja sa rednim baterijama kondenzatora koriste otočno postavljena iskrišta kojima se trenutno premošćuje redna baterija u slučaju kratkog spoja. Ovakva rešenja su koncipirana u suštini kao prenaponska zaštita kod koje se preskok na iskrištu (na sl. 5.6 element br. 6) precizno inicijalizuje sa metal-oksidnim varistorom (ZnO cink – oksidni varistor, element br. 5). Paralelno sa iskrištem kod ovakvih rešenja se ima i sklopka-rastavljač, na sl. 5.6 element br. 7, koji premošćuje iskrište neposredno po uspostavljanju varnice (najduže posle 200 ms). Dakle, za trenutno premošćavanje redne baterije koristi se iskrište a u kasnijoj fazi (najduže posle vremena od 200 ms) paralelni put, koji nešto sporije aktivira sklopka-rastavljač. U postupku stavljanja voda sa rednom kompenzacijom pod napon redna baterija se premošćuje sa opisanim prekidačem kako bi se eliminisao rizik od pojave ferorezonanse. Ova sklopka-rastavljač u grani za premošćavanje se otvara posle izvesnog vremenskog zatezanja i redna baterija je tada aktivna na vodu. Rastavljači R_1 , R_2 i R_3 služe generalno za komutacije bez opterećenja a prigušnica (br. 4 na sl. 5.6) služi za ograničavanje prelaznih pojava u kolu.

Redna kompenzacija se veoma uspešno može primeniti na jako opterećenim gradskim ili industrijskim srednjenaponskim izvodima (10 ili 20 kV), pošto su alternativna rešenja (izgradnja novog voda ili prelaz na viši naponski nivo) po pravilu osetno skuplja.



- 1 – rastavljač R_1 za premošćavanje X_c
- 2 – rastavljači R_2 i R_3 za uključanje X_c
- 3 – redni kondenzator X_c
- 4 – prigušnica
- 5 – metal-oksidni varistor
- 6 – iskrište
- 7 – sklopka za premošćavanje iskrišta

Sl. 5.6 Redna baterija kondenzatora sa otočnim iskrištem

Redna baterija kondenzatora kod visokonaponskih vodova služi za popravku granice stabilnosti, jer se posle njene ugradnje imaju manji ugaoni pomeraji između fazora napona na početku i kraju voda. O ovom aspektu biće više govora u delu analize koji se bavi pitanjima stabilnosti. Pored toga posle ugradnje redne baterije na prenosnom vodu propusna moć voda se povećava.

Reaktivna snaga koju generiše redna baterija kondenzatora se izračunava prema sledećem izrazu:

$$Q^{red} = X_C I^2 \quad (5.10)$$

5.4. Poređenje karakteristika redne i otočne kompenzacije

Treba uočiti da je kod kompenzacije reaktivnih snaga baterijama otočnih kondenzatora, pad napona, odnosno popravka napona, ravnomerno (kontinualno) raspoređena duž voda, dok kod redne kompenzacije postoji skokovita promena napona, sl. 5.4b. Generalno se može smatrati da se isti efekti promene pada napona, odnosno poboljšanja naponskih prilika, mogu ostvariti i sa rednom i sa otočnom kompenzacijom. Regulacija napona, odnosno popravka naponskih prilika je od velikog značaja u mrežama, pošto reaktivna potrošnja može značajno da se menja tokom dana ili sezone.

Sa vektorskog dijagrama, na sl. 5.5, se vidi da projekcija podužne komponente pada napona kod redne kompenzacije (usled postojanja redne baterije kondenzatora) iznosi $IX_C \sin\varphi$. Modifikovanjem ovog izraza se dobija:

$$IX_C \sin\varphi = I \frac{Q_{BK}^{red}}{I^2} \sin\varphi = \Delta U_{X_C} \Rightarrow \Delta U_{X_C} = \frac{Q_{BK}^{red}}{I} \sin\varphi \quad (5.11)$$

S druge strane kod otočne baterije kondenzatora korekcija podužne komponente pada napona je približno:

$$\Delta U \approx \frac{Q_{BK}^{ot} X_V}{U_2} \quad (5.12)$$

Kombinujući (5.11) sa (5.12) može se naći odnos snaga baterija kondenzatora kod redne i kod otočne kompenzacije kojim se ostvaruju isti efekti u pogledu popravke napona:

$$\frac{Q_{BK}^{ot}}{Q_{BK}^{red}} = \frac{\sin\varphi}{X_V \frac{I}{U_2}} \quad (5.13)$$

Dakle, da bi se imali identični efekti u pogledu popravki padova napona u otočne baterije bi trebalo ugraditi, za slučaj da je $\sin\varphi$ oko 0,6 i da je pad napona ($X_V I / U_2$) oko 10%, oko šest puta veću snagu kondenzatora nego kod redne kompenzacije. Naravno da prethodna analiza daje samo okvirne vrednosti. Ako je $\cos\varphi = 0,95$, tada je $\sin\varphi = 0,31$ i za nepromenjen imenitelj (pad napona ostaje 10%) sledi da treba tri puta više kVAr u otočnim baterijama kondenzatora nego u rednim.

Treba ukazati da otočna baterija popravlja $\cos\varphi$ potrošnje, dok redna nema uticaja na faktor snage potrošačkog centra.

U našim distributivnim mrežama više se upotrebljavaju otočne baterije, mada nije isključeno da će sa savremenim tehnološkim rešenjima i trend ugradnje rednih baterija biti povećan.

5.5. Baterije kondenzatora

Baterije kondenzatora ugrađene redno ili otočno se najviše koriste u distributivnim i industrijskim postrojenjima u našem EES-u. Sastoje se od monofaznih kondenzatorskih jedinica koje se formiraju od niza kondenzatorskih elemenata smeštenih u zajednički sud. Baterije se vezuju redno - paralelnim kombinacijama kojima se ostvaruje željena snaga i željeni kapacitet. Takođe se u zajedničkom sudu nalaze i osigurači redno povezanih grana. Kao dielektrik, u počecima industrijske proizvodnje energetskih kondenzatora, korišćen je višeslojni papir impregnisan mineralnim uljima. Ova mineralna ulja su obična transformatorska ulja koja su parafinskog tipa i osetljiva su na starenje kao i na zaprljanje produktima hemijskih reakcija koje nastaju u kondenzatoru delovanjem električnog polja. Umesto njih kasnije su primenjivana ulja na bazi polihlorovanih bifenila (pod komercijalnim nazivom piraleni ili askareli) koja imaju odlične dielektrične karakteristike i nezapaljiva su, ali su se pokazala ekološki veoma nepovoljno jer su praktično nerazgradljiva, a pored toga su i kancerogena.

Danas se niskonaponski kondenzatori (do 1 kV) izrađuju od metalizovanog polipropilenskog filma i po pravilu se ne impregnišu. Proboji koji se javljaju nisu od većeg značaja jer ovako formirani kondenzatori imaju osobinu samoisceljivosti. S druge strane, sredjenaponski kondenzatori (do 35 kV) se danas izrađuju od dvoslojnog polipropilenskog filma (debljine u opsegu od 8 do 18 μm) i od aluminijumske folije (debljine 5 ili 6 μm) uz obavezno impregnisanje odgovarajućim uljem. Od ovih ulja se zahteva da su kompatibilna sa materijalima koji se koriste u proizvodnji kondenzatora, da imaju visoku dielektričnu čvrstoću, smanjenu opasnost od eksplozija prilikom kvarova, zadovoljavajuću otpornost na zaprljanje (tokom proizvodnje i eksploatacije), a posebno netoksičnost i biorazgradljivost uz lako uništavanje, odnosno mogućnost prerade starog ulja. Naravno, u svemu ovome i

cena igra bitnu ulogu. Danas su osvojena i široko primenjena potpuno nova sintetička ulja koja uglavnom zadovoljavaju gornje zahteve. Po električnim osobinama ova ulja su sličnija mineralnim nego hlorisanim uljima i u osnovi su njihove karakteristike kompromis električnih i fizičko-hemijskih karakteristika. Od ovih ulja poznata su benziltoluen, dibenziltoluen, ditoluoletar i fenilksililetan. Pored toga koriste se i kombinacije ovih ulja.

Savremenim rešenjima u proizvodnji kondenzatora za primene u mrežama srednjeg napona sa aluminijumskim folijama spolja i dvoslojnim polupropilenskim filmom impregniranim sintetičkim uljem iznutra, smanjeni su aktivni gubici, tako da se nalaze u opsegu od 0,1 do 0,2 W/kVAr. Prema tome ova su postrojenja beznačajni potrošači aktivne snage. Pored ovog, ekološki problemi su umanjeni, a vek trajanja produžen. Kao osnovne karakteristike sredjenaponskih kondenzatorskih jedinica mogu se navesti sledeće:

- 1) Nominalni napon U_n je 3,6 kV ili 6 kV;
- 2) Maksimalno trajni dozvoljeni napon je $1,1U_n$ (uočava se izražena naponska osetljivost);
- 3) Privremeno dozvoljeni radni napon je $1,15U_n$ i sme da traje ne duže od šest sati u toku jednog dana;
- 4) Skala nominalnih snaga je: 50; 66,6; 75; 100; 125; 150 i 400 kVAr;
- 5) Dozvoljena tolerancija za snagu je $\pm 5\%$ u odnosu na prethodne vrednosti;
- 6) Nominalna učestanost je 50 Hz;
- 7) Temperaturni dijapazon je od -40 do $+40$ °C;
- 8) Uređaj za pražnjenje smanjuje napon jedinice posle isključenja na 50 V za najviše 5 minuta;
- 9) Nominalni kapacitet (sa tolerancijom 5%). je naveden u Tabeli 5.1

Tabela 5.1 Kapaciteti modula u baterijama kondenzatora

Nominalne snage jedinice [kVAr]	50	66,6	75	100	125	150
Kapacitet u μF za 3,6 kV	12,25	16,32	18,38	24,5	30,63	36,75
Kapacitet u μF za 6 kV	4,5	6	6,75	9	11,25	13,5

10) Step izolacije S_i . Za najviši radni napon 3,6 kV stepen izolacije iznosi $3,6 S_i$, tj. dozvoljeni naponi su do 3,6 kV. Za najviši radni napon 7,2 kV stepen izolacije iznosi $7,2 S_i$;

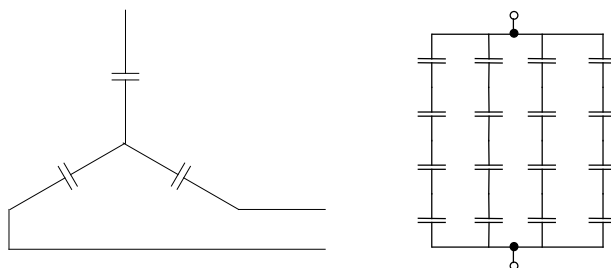
11) Trajno dozvoljeno strujno opterećenje je $1,3I_n$ tj. baterije mogu biti preopterećene za 30% (ukoliko je opterećenje više, a što je često slučaj u mrežama sa višim harmonicima, tada baterije po pravilu stradaju);

12) Koeficijent gubitaka $t\theta\delta$ trebalo bi da je manji od $10 \cdot 10^{-4}$.

Treba ukazati da su jedinične snage od preko 150 kVAr postignute tek sa savremenim tehnološkim rešenjima u proizvodnji kondenzatorskih baterija.

U zavisnosti od potreba, kondenzatorske jedinice se povezuju u trofazne samostalne grupe i baterije. Osnovna sprega kondenzatorskih baterija je neuzemljena zvezda, sl. 5.7.

Zaštita od unutrašnjih kvarova obično se realizuje tako da se formiraju dve polubaterije spregnute u zvezdu sa međusobno spregnutim zvezdištima, sl. 5.8.



Sl. 5.7 Osnovna sprega kondenzatorskih baterija

Principijelna šema baterije otočnih kondenzatora sa zaštitom od neuravnoteženosti preko sekundarnog strujnog relea prikazana je na sl. 5.8.

Na slici 5.8 sa ST1, ST2 i ST3 su označeni strujni transformatori namenjeni za dobijanje prilagođenih strujnih signala (do 5 A) za potrebe kola zaštite i merenja. Rastavljač (R) prikazan na ovoj slici se ne sme upotrebiti za manipulacije pod opterećenjem ili pak za manipulacije sa strujama kratkih spojeva, odnosno njime nije dozvoljeno prekidanje ni radnih struja, niti struja kratkog spoja. Za takve vrste manipulacija (komutacija) služi prekidač (P). Induktivnosti (L) služe za ograničavanje struja pri kratkom spoju i pri uključenju baterija kondenzatora. To su u fabričkoj izradi prigušnice dimenzionisane tako da se ograniče ove struje. Zaštita od neuravnoteženosti realizovana je preko strujnog transformatora, ST3. U principu se taj strujni transformator vezuje između zvezdišta dveju homologih poluzvezda kondenzatorske baterije. Pored zaštite od nesimetrije, baterije se štite i od međufaznih kratkih spojeva i to obično prekostrujnom zaštitom. Baterije kondenzatora trebalo bi takođe štiti i od dozemnih spojeva pomoću zamljospojne strujne zaštite, kao i od prekomernog povišenja napona pomoću prenaponske zaštite. Ugrađuje se i podnaponska zaštita koja štiti baterije od preniskog napona na sabirnicama.

Slično strujnim transformatorima i naponski transformatori imaju ulogu da se preko njih dobiju prilagođeni naponski signali (100 V) za kola signalizacije, merenja i zaštite. I pred strujne i pred naponske transformatore se postavlja zadatak da preslikavanje bude linearno, a što je posebno složen problem kod strujnih transformatora.

Snaga trofazne baterije kondenzatora, u kVAr, za osnovni harmonik, se računa kao:

$$Q_{BK} = 3C\omega U_f^2 10^{-3} \quad (5.14)$$

Gde su:

C - kapacitet baterije po fazi u μF ;

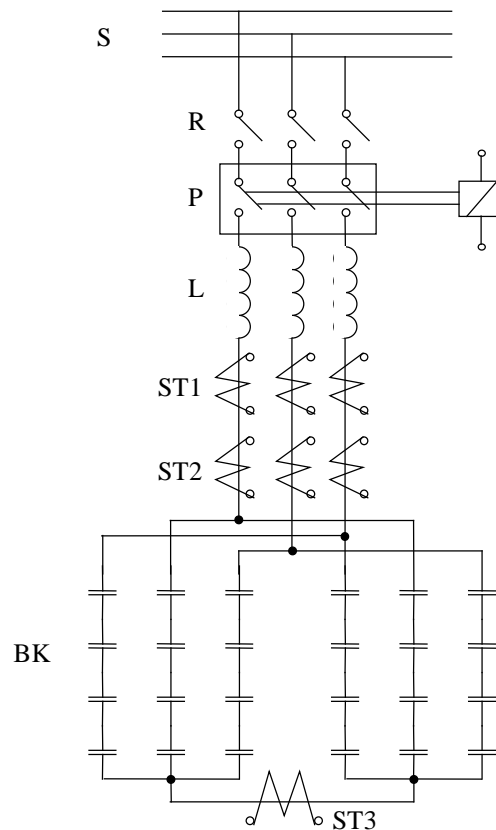
$\omega = 2\pi f$ - nominalna kružna učestanost $\omega = 314$ rad/s;

U_f - efektivna vrednost faznog napona u kV.

U prisustvu viših harmonika snaga baterije kondenzatora, u kVAr, se računa preko sledećeg izraza:

$$Q_{BK} = 3 \sum_{h=1}^{\infty} Ch\omega (U_f^h)^2 10^{-3} \quad (5.15)$$

$h = 1, 3, 5, \dots (2n-1)$ - redni broj harmonika.



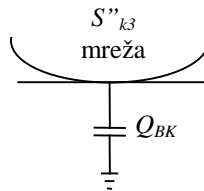
Sl. 5.8 Principijelna šema baterije otočnih kondenzatora sa zaštitom od neuravnoteženosti preko sekundarnog strujnog releja

Najneugodniji harmonici su: 5, 7, 11 i 13. Spregom u trougao mogu se eliminisati 3. i 9. harmonik.

Prilikom rada sa baterijama kondenzatora posebno je osetljiv proces pri uključivanju i isključivanju baterija. Kad se baterija priključi na mrežu pojavljuje se kratkotrajni, tranzijentni tok velike struje uključivanja I_{BK}^{max} , čija se amplituda za slučaj da na sabirnicama nema drugih kondenzatorskih baterija, računa preko formule:

$$I_{BK}^{max} = 1,15\sqrt{2}I_{BK}^{stac} \left(1 + \sqrt{\frac{S_{k3}''}{Q_{BK}}} \right) \quad (5.16)$$

U prethodnoj formuli 1,15 je koeficijent kojim se uvažava realno stanje na vodu dok je sa I_{BK}^{stac} obeležena efektivna vrednost stacionarne struje baterije kondenzatora pri nominalnoj učestanosti a sa S_{k3}'' je označena subtranzijentna trofazna snaga kratkog spoja mreže na sabirnicama na koje se priključuju baterije kondenzatora. Ovo je pokazatelj koji kvantifikuje moćnost mreže.



Sl. 5.9 Priključivanje baterije kondenzatora na sabirnice

Učestanost struje uključjenja je:

$$f = f_n \sqrt{\frac{S''_{k3}}{Q_{BK}}} \quad (5.17)$$

Tipične vrednosti struja uključjenja su oko 20 puta veće od stacionarnih, a učestanosti se mogu približiti i do 1 kHz.

U pogonu je druga situacija kada se baterija kondenzatora priključuje paralelno već postojećim baterijama. U tom slučaju postojeće baterije prazne akumulisanu energiju u bateriji koja se priključuje, što je u suštini identično sa pojavom kratkog spoja na bateriji koja se stavlja pod napon. Ovakve struje su još veće i mogu ići i do $200 I_{BK}^{stac}$ a učestanosti i do 20 kHz, pa se zbog toga stavljaju prigušnice da to ograniče.

5.6. Smanjenje gubitaka aktivne snage

Ukupni gubici aktivne snage na vodu mogu se izračunati pre i posle kompenzacije i zatim se lako nalazi razlika koja pokazuje pozitivan efekat kompenzacije na smanjenje tehničkih gubitaka. Ovo smanjenje se po pravilu procenjuje za stanje koje odgovara maksimalnom opterećenju sistema (ili voda koji se posmatra). Gubici energije mogu se izračunati na godišnjem nivou preko poznavanja ovako izračunatih maksimalnih gubitaka snage i ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka. Ovi gubici energije su merodavni za procenu ekonomskih efekata ugradnje baterija kondenzatora.

Trofazni gubici aktivne snage na vodu i transformatoru sa ukupnom aktivnom otpornošću $R = R_V + R_T$, pre kompenzacije su:

$$P^{gub} = RI^2 = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (5.18)$$

U prethodnoj formuli sa I je označena efektivna, računska (linijska) vrednost struje kroz vod, a sa P i Q trofazna aktivna i reaktivna snaga koja se predaje potrošnji pri linijskom (međufaznom) radnom naponu U . Posle izvršene otočne kompenzacije menja se ukupni iznos reaktivne snage i modul napona, koji postaje U_{BK} , tako da su tada gubici:

$$P_{BK}^{gub} = R \frac{P^2 + (Q - Q_{BK})^2}{U_{BK}^2} \quad (5.19)$$

S druge strane gubici aktivne snage se mogu predstaviti i preko aktivne i reaktivne komponente struje:

$$RI^2 = R(I \cos \varphi)^2 + R(I \sin \varphi)^2 \quad (5.20)$$

Vezivanjem otočnog kondenzatora menja se samo reaktivna komponenta struje. Ako je struja koja se injektira u mrežu od strane kondenzatora I_k tada su gubici aktivne snage posle kompenzacije:

$$RI_k^2 = R(I \cos \varphi)^2 + R(I \sin \varphi - I_k)^2 \quad (5.21)$$

tako da je smanjenje gubitaka snage:

$$\Delta P_g = R(I^2 - I_k^2) = 2(I \sin \varphi) I_k R - I_k^2 R \quad (5.22)$$

U zavisnosti od raspoloživih podataka formula (5.22) može se ponekad pokazati pogodnijom za proračune od formule (5.19).

5.7. Kompenzacija reaktivnih snaga u složenim distributivnim mrežama

Cilj ovog dela je da se prezentira jedna realna tehničko – ekonomska analiza optimalne kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama sa svim specifičnostima i složenostima. Zadatak je po svojoj prirodi studijskog karaktera i kao takav otvara mogućnost upoznavanja sa tokom realizacije jednog vrlo složenog projekta. Polazi se od postavke problema, pa se zatim izlaže tehničko – ekonomski model zadatka optimalne kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama, iza toga se bira pogodna optimizaciona metoda za rešavanje ovako složenog zadatka, da bi na kraju bio prikazan i jedan ilustrativni primer.

Savremeni trend razvoja elektroenergetike u svetu, koji se ogleda u demonopolizaciji i tržišnom načinu poslovanja elektroprivrednih preduzeća, u prvi plan stavlja krajnjeg korisnika električne energije. U cilju njegovog pouzdanijeg i sigurnijeg snabdevanja, kao i u cilju popravke kvaliteta električne energije kod krajnjih potrošača, poslednjih godina je sve prisutnije intenzivno ulaganje u osavremenjavanje, odnosno automatizaciju distributivnih mreža, kao i u popravku njihovih tehničko-ekonomskih karakteristika.

Kompenzacija reaktivne snage i energije, kao jedan od postupaka za popravljavanje kvaliteta električne energije i tehničko-ekonomskih karakteristika elektroenergetskog sistema, iz svih ovih razloga ponovo postaje veoma aktuelna. Imajući u vidu činjenicu da je kompenzaciju ekonomično vršiti dominantno u blizini same reaktivne potrošnje (problem regulisanja reaktivnih snaga i naponskih prilika je generalno lokalnog karaktera), to su se istraživanja i realizacija kompenzacije reaktivne snage poslednjih godina, koncentrisala na kompenzaciju u elektrodistributivnim mrežama. Industrijski potrošači značajno učestvuju u ukupnom reaktivnom konzumu elektrodistributivnih mreža. Takođe i u domaćinstvima (posebno prigradskog i seoskog tipa, zbog dodatnih delatnosti za čije obavljanje se koriste asinhroni motori), faktor snage pokazuje tendencije značajnog pogoršanja. Konačno, gubici reaktivne energije u elementima distributivne mreže (transformatorima i nadzemnim vodovima) predstavljaju značajnu komponentu ukupne reaktivne potrošnje distributivnih mreža.

Kompenzacija reaktivne snage u distributivnim mrežama vodi višestrukim pozitivnim tehničkim i ekonomskim efektima, od kojih su glavni pobrojani u narednom pregledu:

- Mogućnost prenosa veće aktivne snage za isti kapacitet energetskih transformatora, kablovskih i nadzemnih vodova distributivne mreže;
- Oslobođanje proizvodnih (generatorskih) i prenosnih kapaciteta (vodova i transformatora) za dodatnu proizvodnju i prenos aktivne snage;
- Snižavanje gubitaka aktivne energije na ukupnom putu od izvora napajanja do mesta njene potrošnje;
- Sniženje godišnje vršne aktivne snage;
- Smanjenje induktivne komponente struje u mreži i smanjenje gubitaka reaktivne snage;
- Sniženje padova napona i poboljšanje naponskih stanja u režimu maksimalnih opterećenja;
- Smanjenje plaćanja za prekomerno preuzetu reaktivnu energiju na mesečnom horizontu koje elektrodistributivno preduzeće vrši prema prenosnom sistemu.

Pitanju uticaja kvaliteta električne energije na tehničko-ekonomske pokazatelje tehnoloških procesa u industrijskim preduzećima najčešće se ne posvećuje dovoljna pažnja. Negativan uticaj odstupanja pokazatelja kvaliteta električne energije na rad industrijskih postrojenja ogleda se kroz:

- Pojavu tehnoloških šteta zbog sniženja kvaliteta finalnih proizvoda, sniženja proizvodnosti i produktivnosti, ili gubitaka sirovina;
- Pojavu šteta elektromagnetske prirode zbog povećanja gubitaka električne energije, ispada i zastoja uređaja, nepravilnog rada automatike, telekomunikacionih uređaja i računarskih sistema.

Održavanje kvaliteta električne energije u zahtevanim granicama izuzetno je složeno, jer promene kvaliteta imaju slučajni karakter, pa je nedostatak statističkih informacija o pokazateljima kvaliteta električne energije, kao i nedostatak odgovarajućih kontrolnih punktova sa uređajima za merenje, ozbiljna prepreka. Takođe, ozbiljan problem predstavlja i formiranje preciznog matematičkog modela za ekonomsko vrednovanje kvaliteta električne energije.

Među fizičkim veličinama koje određuju kvalitet električne energije (napon i učestanost), napon se javlja kao fizička veličina čije odstupanje od optimalnih vrednosti dovodi do izrazitih ekonomskih posledica. Negativan efekat ima odstupanje napona od optimalne vrednosti u oba smera. Na odstupanje napona su osetljivi uređaji automatike i zaštite, motori, sistemi osvetljenja, digitalni računari i drugi potrošači.

Posledice odstupanja od optimalnih naponskih nivoa su niži kvalitet finalnih proizvoda koji izlaze sa tehnoloških linija, povećana specifična potrošnja električne energije i povećani gubici električne energije. Praktična konsekvenca prethodnog razmatranja je zahtev za održavanjem optimalnog napona kako u distributivnim mrežama tako i u industrijskim preduzećima.

Prekomerna odstupanja napona mogu da izazovu:

- pregrevanje statora i rotora asinhronih motora, smanjenje polaznih i radnih momenata motora i ispade motora;
- skraćivanje veka trajanja inkadescentnih svetiljki;
- povećanje struje praznog hoda transformatora;
- povećanje gubitaka aktivne energije u motorima, vodovima i transformatorima;
- povećanje potrošnje reaktivne snage pretvaračkih uređaja;
- produžavanje trajanja nekih tehnoloških procesa.

Tesna veza kvaliteta napona i reaktivnih prilika u mreži uslovlila je da se kao značajan regulacioni resurs za kontrolu kvaliteta napona koriste uređaji za kompenzaciju reaktivne snage.

Baterije otočnih i rednih kondenzatora verifikovane su kao najefikasnije i najekonomičnije sredstvo za kompenzaciju reaktivne snage u distributivnim mrežama, ukoliko se izuzmu specifične lokacije u kojima se zahteva dinamička kompenzacija brzih i velikih varijacija reaktivne snage. Tada je prioritet na strani kompenzacionih uređaja tipa tiristorski kontrolisanih reaktora

(TCR) i tiristorski kontrolisanih kapaciteta (TCC). Otočni kondenzatori imaju niz prednosti u odnosu na ostala kompenzaciona sredstva. To se pre svega odnosi na njihovu relativno nisku cenu, zatim na niske zahteve u pogledu troškova i načina održavanja, vrlo niske gubitke aktivne snage u samim baterijama, modularno izvođenje sa relativno lakom procedurom povećavanja ili smanjivanja instalisane snage baterija, mogućnost realizacije vrlo širokog zahtevanog spektra instalisanih snaga baterija kombinovanjem osnovnih modula, kao i druge prednosti.

5.7.1. Formulacija problema optimalne kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama

Optimalna kompenzacija reaktivne snage i energije u distributivnim mrežama postavlja se kao tehničko-ekonomski optimizacioni problem. Metodologija optimalne kompenzacije reaktivne snage se zasniva na optimizaciji funkcije aktualizovanih troškova uz uvažavanje ušteda usled smanjenja vršne vrednosti aktivne snage i smanjenja gubitaka aktivne energije. Pored ovoga kao jedan od članova kriterijumske funkcije mogu se pojaviti i uštede usled smanjenja plaćanja za prekomerno preuzetu reaktivnu energiju. Uštede koje se pri tome postižu zavise od veličine instalisane snage kondenzatorskih baterija, mesta njihovog postavljanja i optimalnog vremena uključenosti otočnih kondenzatora (ukoliko se ne radi o fiksnim baterijama), tipa kondenzatora (neregulisani ili regulisani) i broja kondenzatorskih baterija. Rešavanje optimalne kompenzacije reaktivne snage u distributivnim mrežama podrazumeva određivanje pobrojanih elemenata uzimajući u obzir ekonomski faktor (cenu određenog tehničkog rešenja), pri čemu je osnovni cilj ostvarenje maksimalne uštede uz zadovoljavanje tehničkih zahteva i ograničenja.

Naime, u fazi projektovanja kompenzacije, kao i pratećih elemenata zaštite i automatike, treba uzeti u obzir tehnička ograničenja koja su nezavisna od ekonomskih uslova i koja mogu da eliminišu mogućnost primene baterija kondenzatora na pojedinim lokacijama ili da redukuju vrednost snage kondenzatorskih baterija. Tehnička ograničenja koja mogu da diktiraju izbor baterija kondenzatora su: opasnosti od rezonanse, opasnosti od samopobuđivanja i generisanja harmonika, zatim stacionarni i tranzijentni prenaponi. Pored ovih uticajni su i građevinski preduslovi da se rešenje realizuje, zaštita ljudi i okoline i slično.

Uvažavanje realnosti dovodi do formulacije problema kompenzacije kao mešovitog celobrojnog nelinearnog problema, za čije rešavanje je u opštem slučaju potrebno primeniti komplikovan matematički aparat. Ono što se po pravilu javlja u formulaciji problema je da se kompenzacija definiše kao kombinatorni optimizacioni problem u kome mogući teorijski broj kombinacija eksplozivno raste, (dostižući džinovske razmere kod distributivnih mreža sa 1000 i više čvorova), a koje ni savremeni računari ne bi u razumnom vremenu mogli da istraže. Formulacija problema sa glatkim analitičkim funkcijama na koje se lakše primenjuju različite optimizacione tehnike vodi do prevelikog pojednostavljenja koje nije prihvatljivo za praksu.

Kao ilustraciju korisno je analizirati distributivnu mrežu od 10 čvorova i pretpostaviti da je u nju moguće ugraditi kondenzatorske baterije na najviše tri lokacije. Ukupan broj varijanti za lociranje baterija kondenzatora V_{BK} , za mrežu od N čvorova sa maksimalno N_{BK}^{max} lokacija može se iskazati kao suma kombinacija bez ponavljanja N elemenata dužine N_{BK} :

$$V_{BK}(N, N_{BK}^{max}) = \sum_{N_{BK}=1}^{N_{BK}^{max}} C_{N_{BK}}^N \quad (5.23)$$

ili u ovom primeru:

$$V_{BK}(10,3) = \sum_{N_{BK}=1}^3 C_{N_{BK}}^{10} = C_1^{10} + C_2^{10} + C_3^{10} = \frac{10}{1} + \frac{10 \cdot 9}{2 \cdot 1} + \frac{10 \cdot 9 \cdot 8}{3 \cdot 2 \cdot 1} = 175$$

Ukupan broj stanja koja treba analizirati se drastično povećava s obzirom da pored ispitivanja lokacija, treba ispitati i sve moguće kombinacije diskretnih vrednosti snaga kondenzatora. Ako se sa N_M označi maksimalan broj modula koji se može instalirati u jedan čvor, ukupan broj analiziranih stanja V_{BK}^{uk} , može se izraziti kao suma proizvoda kombinacija bez ponavljanja N elemenata dužine N_{BK} i kombinacija sa ponavljanjem N_M elemenata dužine N_{BK} :

$$V_{BK}^{uk}(N, N_{BK}^{max}, N_M) = \sum_{N_{BK}=1}^{N_{BK}^{max}} C_{N_{BK}}^N \bar{C}_{N_M}^{N_{BK}} \quad (5.24)$$

ili u ovom primeru (za $N_M = 4$):

$$V_{BK}^{uk}(10,3,4) = \sum_{N_{BK}=1}^3 C_{N_{BK}}^{10} \bar{C}_4^{N_{BK}} = \frac{10}{1} \cdot 4^1 + \frac{10 \cdot 9}{2 \cdot 1} \cdot 4^2 + \frac{10 \cdot 9 \cdot 8}{3 \cdot 2 \cdot 1} \cdot 4^3 = 8440$$

Pošto ova analiza daje teorijski najnepovoljniji broj stanja za ispitivanje (ovaj broj moguće je značajno redukovati primenom informacija o realnoj mreži), to se pokazuje da ovaj pristup zahteva nedopustivo dugo računarsko vreme.

Većina pristupa u literaturi izbegava pretraživanje svih mogućih kombinacija, pa nijedno od tih rešenja ne garantuje nalaženje globalnog optimuma, već se sa manjom ili većom efikasnošću pronalaze bolji ili lošiji lokalni optimumi. Prema tome, kao zasebna kategorija metoda rešavanja javljaju se algoritmi delimičnog pretraživanja. Naravno, cilj ovih algoritama je da se pre svega približe, što je to moguće bliže, globalnom optimumu, pri čemu se insistira da to bude u što kraćem vremenu (što manji broj pretraživanih kombinacija na što je moguće efikasnije formulisan način).

Imajući u vidu da je problem kompenzacije zapravo planerski problem, proračunsko vreme nije od suštinskog interesa. Osnovni zahtev je da metoda bude pouzdana u traženju najboljeg rešenja i da pri tome obavezno uvažava realne fizičke i operativne uslove (tehnička ograničenja) koji se imaju u posmatranom distributivnom sistemu, odnosno onog rešenja koje je najbliže globalnom optimumu a izbegava neprihvatljive simplifikacije. Pitanje brzine proračuna je stoga pitanje na koje dominantno utiču više ili manje efikasna programerska rešenja, iako u razvojnoj fazi i pri pretraživanju velikog broja alternativa ni ovo pitanje ne bi trebalo zanemariti.

Jedna od metoda koja će ovde biti predstavljena se zasniva na algoritmu pretraživanja varijanti i formulisana je kao nelinearni optimizacioni problem koji u sebe direktno uključuje:

- distributivne tokove snaga;
- diskretnu prirodu mogućih lokacija kondenzatora;
- cenu kondenzatora posmatranu kao proizvoljnu stepenastu nediferencijabilnu funkciju koja sadrži fiksni deo cene instalacije kondenzatora i promenljivi deo cene koja je linearna funkcija instalisane snage kondenzatora;
- različite funkcije cene kondenzatora u zavisnosti od instalisane snage baterija za različite naponske nivoe distributivne mreže (35 kV, 20 kV, 10 kV, 0.4 kV);
- potrošače modelovane u skladu sa strukturom konzuma;
- baterije kondenzatora modelovane na bazi konstantne admitanse, što je najkorektniji pristup modelovanju sa fizičkom stanovišta, mada je u modelu ostavljena mogućnost da se baterije eventualno modeluju i kao konstantna snaga ili struja, i to samo za neka teorijska istraživanja;
- uticaj generisanja reaktivne snage od strane kablovskih vodova na nivo optimalne kompenzacije u mešovitim nadzemno-kablovskim distributivnim mrežama;
- realno ponašanje dijagrama aktivnog i reaktivnog opterećenja potrošačkih čvorova i izbegavanje pretpostavke identičnosti normalizovanih dijagrama aktivnog i reaktivnog opterećenja svih potrošačkih čvorova ili linearnih bočnih grana;
- realno ponašanje dijagrama napona izvornog čvora na bazi izmerenih satnih vrednosti napona TS 110/35(10) kV/kV i to u intervalu od 12 meseci;
- nalaženje optimuma na bazi efikasnog pretraživanja ograničenog broja mogućih rešenja;
- definiciju kriterijumske funkcije sa 3 elementa:
- smanjenje godišnje vršne aktivne snage,
- smanjenje gubitaka aktivne energije na godišnjem optimizacionom intervalu,
- uvažavanje aktualizovanih investicija u kondenzatorske baterije.

U analizama se razmatraju kako neregulisane tako i regulisane baterije kondenzatora. Krajnji potrošači u ovim analizama nalaze se na niskonaponskim stranama transformatorskih stanica 10(20)/0,4 kV/kV za potrošače iz kategorije domaćinstva i administrativno - komercijalnog sektora, odnosno mesta kupoprodaje električne energije za industrijske potrošače.

Potrošnja reaktivne snage transformatorske stanice koja napaja domaćinstva i administrativno - komercijalni sektor, kao što se može proveriti merenjima, zbog relativno dobrog statističkog izravnavanja većeg broja potrošača, slabo varira na manjim vremenskim intervalima (dan, sedmica, mesec). Osetnije varijacije mogu se primetiti tek na sezonskom nivou a uzrokovane su uvećanom upotrebom rashladnih uređaja u administrativno-komercijalnom sektoru tokom leta, odnosno dodatnim delatnostima u prigradskim naseljima i selima tokom letnje i jesenje sezone. U slučaju ovako sporih promena reaktivnog konzuma instalacija regulisanih baterija nije ekonomična, jer se na ove promene može odgovoriti manuelnim povećanjem/smanjenjem instalisane snage u pojedinim čvorovima mreže jednom do dva puta godišnje.

S druge strane, krupniji industrijski potrošači, kod kojih proizvodni proces zahteva znatniju upotrebu reaktivne snage, dominantno su opremljeni kompenzacionim uređajima koji veoma efikasno mogu održavati faktor snage potrošača u zadatim granicama. Stoga se reaktivna potrošnja i ove grupa potrošača, sa aspekta distributivne mreže, može smatrati slabo promenljivom.

Dodatni razlog za favorizovanje fiksnih kondenzatorskih baterija je i njihova znatno niža investiciona vrednost, kao i znatno blaži zahtevi u pogledu održavanja u odnosu na regulisane jedinice. Konačno, i poslednji razlog koji motiviše izbor fiksnih baterija je izuzetno oskudan skup informacija o potrošnji krajnjih potrošača distributivne mreže. Naime, za razliku od analize sa fiksnim kondenzatorskim baterijama kod koje se uglavnom operiše sa srednjim sezonskim snagama (energijama), za korektnu realizaciju rešenja sa regulisanim kondenzatorskim baterijama neophodna je vrlo precizna informaciona osnova o dnevnom dijagramu trajanja aktivnog i reaktivnog opterećenja u svakoj TS 10/0.4 kV (istovremena merenja na intervalu od 12 meseci u svim transformatorskim stanicama). Pored toga, uslov je da ovako izmereni dijagrami opterećenja i po obliku i po apsolutnom iznosu ostanu nepromenjivi i u budućem periodu.

5.7.2. Postupak rešavanja optimalne kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama na bazi pretraživanja varijanti

Ovaj složeni algoritam funkcionalno je podeljen u tri celine:

- Prikupljanje i unos podataka o konfiguraciji i parametrima radikalne distributivne mreže i informacija o potrošnji specijalnih i ugovornih potrošača, kao i potrošača iz kategorije domaćinstva i administrativno - komercijalnog sektora;
- Procena godišnjih dijagrama opterećenja krajnjih potrošača, proračun naponskih profila i struja grana u nekompenzovanoj mreži;
- Optimalna kompenzacija reaktivne snage u distributivnim mrežama.

Osnovni problem koji se javlja, ne samo u slučaju optimalne kompenzacije, već i pri bilo kojoj analizi distributivne mreže je nedostatak pouzdanih informacija o godišnjem dijagramu opterećenja krajnjih potrošača. Kao što je već napomenuto, krajnji potrošači tipa domaćinstva locirani su na 0.4 kV strani TS 10/0.4 kV/kV, a specijalni i ugovorni potrošači na sekundarnoj strani TS koja je u vlasništvu elektrodistributivnih preduzeća. Kako permanentna merenja na ovim lokacijama ne postoje,

razvijeno je više postupaka kako da se problem određivanja dijagrama opterećenja krajnjih potrošača reši uz zadovoljavajuću tačnost. Osnovni pristup bazira se na pojedinačnim merenjima reprezentativnih potrošača i preslikavanju ovih podataka na potrošače istog tipa. Nedostaci ovog pristupa su potreba za velikim brojem mernih garnitura, ukoliko se na posmatranoj distributivnoj mreži nalazi veliki broj ugovornih potrošača (industrije) sa specifičnim režimima potrošnje električne energije, kao i potreba da se merenja vrše tokom cele godine. Stoga je osnovna ideja da se maksimalno iskoriste već raspoloživi podaci koji se prikupljaju na dodiru prenosne i distributivne mreže (sabirnice na sekundaru TS 110/x kV/kV), kao i informacije o lokalnoj potrošnji.

Sledeći problem koji se nameće je izbor broja i način određivanja diskretnih nivoa opterećenja koji će biti reprezent već pomenutih satnih merenja na godišnjem nivou. Ovde je izvršen kompromis između potrebe za što detaljnijim modelom krajnjih potrošača i realno raspoloživih podataka, usvajanjem četiri vremenska segmenta koji odgovaraju sezonama zima, proleće, leto i jesen.

Modul za unos konfiguracije i parametara mreže

U okviru ovog modula rešen je problem efikasog i tačnog unosa konfiguracije i parametara mreže. Za ove potrebe kreira se baza podataka elemenata distributivne mreže (transformatora, nadzemnih i kablovskih vodova) koji se standardno koriste u distributivnim sistemima. Na ovaj način posao oko unosa parametara mreže sveden je na aktivnosti umetanja elemenata iz baze podataka, čime je značajno smanjena pojava grešaka pri unosu podataka realnih distributivnih mreža sa preko hiljadu čvorova. Naravno, za neke karakteristične elemente ostavljena je mogućnost ručnog unosa podataka.

Ovim modulom je obezbeđeno i striktno formiranje radijalnih mreža, sa pripremom svih podataka vezanih za incidenciju elemenata mreže, čime se značajno olakšava primena algoritma za tokove snaga radijalnih mreža.

Procena potrošnje krajnjih potrošača i određivanje stanja u nekompenzovanoj mreži

Korektna analiza stanja distributivne mreže zahteva izradu detaljnog modela te mreže. Ovim modelom moraju biti obuhvaćeni svi elementi distributivne mreže koji su vlasništvo elektrodistributivnog preduzeća a koji su potencijalne lokacije za ugradnju kompenzacionih postrojenja. Ključni podaci neophodni za ovu analizu, pored topologije i parametara mreže, su podaci o dijagramima opterećenja krajnjih potrošača.

Pod pojmom "krajnji potrošači" podrazumevaju se potrošački čvorovi koji odgovaraju sekundarima transformatora X kV / 0.4 kV za transformatorske stanice koje napajaju potrošače iz kategorije domaćinstva i administrativno-komercijalnog sektora, odnosno potrošački čvorovi koji odgovaraju mernim mestima kupoprodaje električne energije kod industrijskih potrošača.

Za razliku od proizvodno-prenosnog dela elektroenergetskog sistema u kome se analize stanja vrše na bazi redundantnog skupa informacija, permanentna merenja u distributivnim mrežama su veoma oskudna. Na nivou cele distributivne mreže (tačka dodira prenosne i distributivne mreže) postoje permanentna merenja (ne na svim TS 110/x kV/kV) sledećih veličina:

- satne vrednosti aktivne i reaktivne snage na sabirnicama x kV TS 110/x, koje se preko SCADA sistema prikupljaju u prenosnom preduzeću (merenja ne postoje za sve TS);
- merenja satnih modula napona na istim sabirnicama i modula struja po fiderima x kV koje prikuplja lokalna elektrodistribucija (takođe ne na svim TS).

Na drugom kraju distributivnog sistema za konkretne kategorije potrošača na raspolaganju su šarolike grupe podataka. Za industrijske potrošače obično su na raspolaganju informacije iz njihovih mesečnih računa za električnu energiju koji sadrže podatke o utrošenim mesečnim aktivnim energijama, vršnim snagama i količinama prekomerno preuzete reaktivne energije. Veliki problem predstavlja nedovoljan skup informacija o potrošnji domaćinstava i administrativno - komercijalnog sektora. Za estimaciju ove potrošnje koriste se svi raspoloživi podaci, od informacija o sezonskim potrošnjama pojedinačnih potrošača i njihovog sumiranja na nivou transformatorske stanice, do raspodele registrovanog regionalnog opterećenja na pojedine stanice prema kriterijumu nominalnih snaga.

Takođe, po pravilu je na raspolaganju mali broj mernih uređaja, tako da na taj način prikupljena merenja nisu bila dovoljna za primenu korektno metodologije estimacije opterećenja. Stoga je korisno na bazi realno raspoloživih podataka na konkretnim mrežama, omogućiti generisanje dijagrama opterećenja krajnjih potrošača.

Sušтина ove metodologije se sastoji u sledećem:

1. Izvršena je klasifikacija potrošačkih čvorova (odnosno, transformatorskih stanica) na:

- industrijske (ugovorne) potrošače;
- potrošače iz kategorije domaćinstva i administrativno-komercijalnog sektora;
- mešovite potrošače (transformatorske stanice koje napajaju i ugovorne potrošače i domaćinstva).

2. Za sve industrijske potrošače, pored šifara transformatorskih stanica sa kojih se isti napajaju, dobijeni su i mesečni izveštaji o utrošenoj električnoj energiji, koji se sastoje od informacija o:

- vršnim mesečnim snagama P_j^{max} ;
- utrošenoj (mesečnoj) aktivnoj energiji W_j^{max} ;
- prekomerno preuzetoj reaktivnoj energiji W_j^{ppr} .

3. Za potrošače iz kategorije domaćinstva i administrativno-komercijalnog sektora, dobijena je baza podataka koja sadrži sledeće informacije: pridruženi elektrodistributivni broj potrošača, adresu potrošača, šifru transformatorske stanice iz koje se on napaja i sezonska očitavanja njegovog brojila (za neke TS ovi podaci nisu bili raspoloživi pa su korišćeni podaci o potrošnji na širem potrošačkom području).

4. Godišnji dijagram opterećenja potrošača podeljen je na pet segmenata koji odgovaraju vršnom satu i sezonama zima, proleće, leto i jesen. Ovo je minimalno prihvatljiv broj segmenata sa aspekta razvijene metodologije, ali je ujedno maksimum koji se mogao izvući iz raspoloživog skupa informacija.

5. Ekvivalentan godišnji dijagram opterećenja industrijskih potrošača određen je na sledeći način:

$$P_{max} = P_{jm}^{max} f_{jm} \quad (5.25)$$

$$Q_{max} = P_{max} \frac{W_{jm}^{ppr} + W_{jm}^{akt} \operatorname{tg}(\arccos(0.95))}{W_{jm}^{akt}} \quad (5.26)$$

$$P_1^{sr} = \frac{W_{12}^{akt} + W_1^{akt} + W_2^{akt}}{T_{12} + T_1 + T_2} \quad (5.27a)$$

$$Q_1^{sr} = \frac{W_{12}^{ppr} + W_1^{ppr} + W_2^{ppr} + P_1^{sr} \operatorname{tg}(\arccos(0.95))}{T_{12} + T_1 + T_2} \quad (5.28a)$$

$$P_2^{sr} = \frac{W_3^{akt} + W_4^{akt} + W_5^{akt}}{T_3 + T_4 + T_5} \quad (5.27b)$$

$$Q_2^{sr} = \frac{W_3^{ppr} + W_4^{ppr} + W_5^{ppr} + P_2^{sr} \operatorname{tg}(\arccos(0.95))}{T_3 + T_4 + T_5} \quad (5.28b)$$

$$P_3^{sr} = \frac{W_6^{akt} + W_7^{akt} + W_8^{akt}}{T_6 + T_7 + T_8} \quad (5.27c)$$

$$Q_3^{sr} = \frac{W_6^{ppr} + W_7^{ppr} + W_8^{ppr} + P_3^{sr} \operatorname{tg}(\arccos(0.95))}{T_6 + T_7 + T_8} \quad (5.28c)$$

$$P_4^{sr} = \frac{W_9^{akt} + W_{10}^{akt} + W_{11}^{akt}}{T_9 + T_{10} + T_{11}} \quad (5.27d)$$

$$Q_4^{sr} = \frac{W_9^{ppr} + W_{10}^{ppr} + W_{11}^{ppr} + P_4^{sr} \operatorname{tg}(\arccos(0.95))}{T_9 + T_{10} + T_{11}} \quad (5.28d)$$

gde je:

P_{max}, Q_{max} - aktivno i reaktivno opterećenje potrošača u vršnom satu celog konzuma distributivne mreže;

P_i^{sr}, Q_i^{sr} - srednja aktivna i reaktivna potrošnja na vremenskom segmentu i ;

f_{jm} - faktor jednovremenosti vršnih opterećenja industrijskih potrošača;

W_{jm}^{akt}, W_j^{ppr} - aktivna i prekomerno preuzeta reaktivna energija u mesecu j ;

P_j^{max} - registrovano vršno opterećenje u mesecu j ;

T_j - broj sati u mesecu j ;

jm - indeks meseca u kome je ostvareno vršno opterećenje distributivne mreže.

6. Ekvivalentni godišnji dijagram krajnjih potrošača iz kategorije domaćinstava, određen je na sledeći način:

$$P_1^{sr} = \frac{W_{jz}^{akt} k_z}{T_{12} + T_1 + T_2} \quad (5.29a)$$

$$Q_1^{sr} = P_1^{sr} \operatorname{tg}(\arccos(\varphi_z)) \quad (5.30a)$$

$$P_2^{sr} = \frac{W_{pl}^{akt} k_p}{T_3 + T_4 + T_5} \quad (5.29b)$$

$$Q_2^{sr} = P_2^{sr} \operatorname{tg}(\arccos(\varphi_p)) \quad (5.30b)$$

$$P_3^{sr} = \frac{W_{pl}^{akt}(1-k_p)}{T_6 + T_7 + T_8} \quad (5.29c)$$

$$Q_3^{sr} = P_3^{sr} \operatorname{tg}(\arccos(\varphi_l)) \quad (5.30c)$$

$$P_4^{sr} = \frac{W_{jz}^{akt}(1-k_z)}{T_9 + T_{10} + T_{11}} \quad (5.29d)$$

$$Q_4^{sr} = P_4^{sr} \operatorname{tg}(\arccos(\varphi_j)) \quad (5.30d)$$

$$P_{max} = P_1^{sr} f_{jdm} \quad (5.31)$$

$$Q_{max} = Q_1^{sr} \quad (5.32)$$

U gornjim relacijama oznake imaju sledeće značenje:

W_{jz}^{akt} - aktivna energija utrošena tokom sezone jesen/zima;

W_{pl}^{akt} - aktivna energija utrošena tokom sezone proleće/leto;

k_z - koeficijent relativnog učešća zimskog dela potrošnje električne energije u zbirnoj potrošnji sezona jesen/zima;

k_p - koeficijent relativnog učešća prolećnog dela potrošnje električne energije u zbirnoj potrošnji sezona proleće/leto;

$\cos\varphi_z, \cos\varphi_p, \cos\varphi_l, \cos\varphi_j$ - srednji faktori snage potrošača tokom svake sezone;

f_{jdm} - faktor jednovremenosti za domaćinstva kroz koji se može uvažiti i korekcionni faktor za određivanje vršnog opterećenja potrošača.

7. Dijagram opterećenja transformatorskih stanica, koje napajaju mešovite potrošače, određen je tako da su formirani ekvivalentni dijagrami ugovornih potrošača sa jedne, i domaćinstava sa druge strane. Rezultantni dijagram je određen agregacijom prethodna dva.

8. Ukoliko za posmatranu mrežu postoje podaci o godišnjoj vršnoj snazi i srednjim sezonskim potrošnjama aktivne i reaktivne snage ili ih je moguće proračunati, vrši se korekcija pretpostavljenih faktora f_{jm} , k_z , k_p , $\cos\varphi_z, \cos\varphi_p, \cos\varphi_l, \cos\varphi_j$, f_{jdm} , kako bi zbir potrošnji krajnjih potrošača uvećan za gubitke u distributivnoj mreži odgovarao izmerenim vrednostima na dodiru prenosne i distributivne mreže.

5.7.3. Algoritam za optimalnu kompenzaciju reaktivnih snaga u distributivnim mrežama

Zadatak nalaženja optimalne kompenzacije reaktivne snage i energije svodi se na tehničko-ekonomski optimizacioni problem. Metodologija izbora optimalne kompenzacije reaktivne snage zasniva se na optimizaciji funkcije aktualizovanih troškova uz uvažavanje ušteda usled smanjenja vršne vrednosti aktivne snage i smanjenja gubitaka aktivne energije. Za razliku od ušteda usled smanjenja vršnog opterećenja i gubitaka aktivne energije koje imaju i tehnički i ekonomski značaj, prekomerno preuzeta reaktivna energija, koju elektrodistributivno preduzeće plaća proizvodno-prenosnom delu sistema, predstavlja čisto ekonomsku kategoriju. Važećim tarifnim sistemom predviđa se plaćanje prekomerno preuzete reaktivne energije tokom većeg delovnog stava na nivou celog elektrodistributivnog preduzeća. Kriterijumska funkcija, koja predstavlja uštede na godišnjem nivou (razliku dobiti od smanjenja vršne aktivne snage, gubitaka aktivne energije i aktualizovanih investicija), ostvarene ugradnjom kondenzatorskih baterija, data je sledećim izrazom:

$$F = c_P(P_{max}^0 - P_{max}^k) + c_W \sum_{j=1}^T \sum_{gr=1}^M \left[3R_{gr} \left(|I_{gr,j}^0|^2 - |I_{gr,j}^k|^2 \right) T_j \right] - \sum_{k \in Q_k} (C_F + c_V Q_k) p_a \quad (5.33)$$

gde je:

c_P [N.J./kW] - ekvivalentna cena vršne aktivne snage,

c_W [N.J./kWh] - ekvivalentna cena gubitaka aktivne energije,

P_{max}^0 - vršna vrednost aktivne snage (na godišnjem nivou) za nekompensovan sistem,

P_{max}^k - vršna vrednost aktivne snage (na godišnjem nivou) za kompenzovan sistem,

$\underline{I}_{gr,j}^0$ - kompleksna vrednost struje grane gr na segmentu j za nekompenzovan sistem,

$\underline{I}_{gr,j}^k$ - kompleksna vrednost struje grane gr na segmentu j nakon kompenzacije,

R_{gr} - aktivna otpornost grane $gr = 1, 2, \dots, M$,

T - ukupan broj segmenata,

M - ukupan broj grana,

T_j [h] - trajanje vremenskog segmenta j ,

C_F [N.J.] - fiksna cena ugradnje kondenzatorskog postrojenja,

c_V [N.J./kVAr] - varijabilna cena ugradnje kondenzatora,

Q_k [kVAr] - instalisana snaga kondenzatora u čvoru k ,

p_a - stopa aktualizacije,

Ω_k - skup čvorova u kojima su ugrađene baterije kondenzatora.

Oznaka N.J. koristi se kao skraćenica za novčanu jedinicu.

Pored standardnih ograničenja vezanih za module napona u čvorovima distributivne mreže i ograničenja vezanih za fizičke mogućnosti ugradnje kondenzatorskih baterija na pojedine lokacije u mreži, korisno je uvesti i jedno dopunsko ograničenje. Analizom rezultata uočeno je da postoji tendencija izbora optimalnog rešenja sa što manjim brojem lokacija. Naime, postojanje fiksnog dela troškova kondenzatorskih baterija poskupljuje njihovu jediničnu cenu (N.J./kVAr) sa porastom broja lokacija. Ova činjenica u nekim konkretnim slučajevima može dovesti do pojave tzv. prekompenzacije čvora, odnosno do vraćanja reaktivne energije na više nivoa. Iako ne postoje propisi koji ovu pojavu izričito zabranjuju, ipak se smatra da ona nije poželjna, pa je maksimalna instalisana snaga kondenzatorske baterije u nekom čvoru ograničena nivoom reaktivne potrošnje tog čvora.

Kao što se iz formulacije problema može videti, problem optimalne kompenzacije reaktivne snage u distributivnim mrežama predstavlja nelinearan, mešovito celobrojan, nediferencijabilan i nekonveksan problem velike dimenzionalnosti. Za rešavanje ovog problema razvijen je čitav niz algoritama. Nažalost, ni jedan od ponuđenih pristupa ne garantuje dostizanje globalnog optimuma kriterijumske funkcije. Iako problem optimalne kompenzacije spada u planerske probleme (računsko vreme potrebno za rešavanje ovog problema nije strogo ograničeno kao za aplikacije u realnom vremenu), jedini prilaz koji vodi globalnom optimumu - ispitivanje svih mogućih kombinacija lokacija i snaga kondenzatorskih baterija, zbog enormno visokih vremenskih zahteva (za realne mreže sa preko hiljadu čvorova) praktično nije primenljiv. Stoga se kod optimizacionih postupaka teži da se, odričući se globalnog optimuma, broj ispitivanih varijanti svede u prihvatljive okvire.

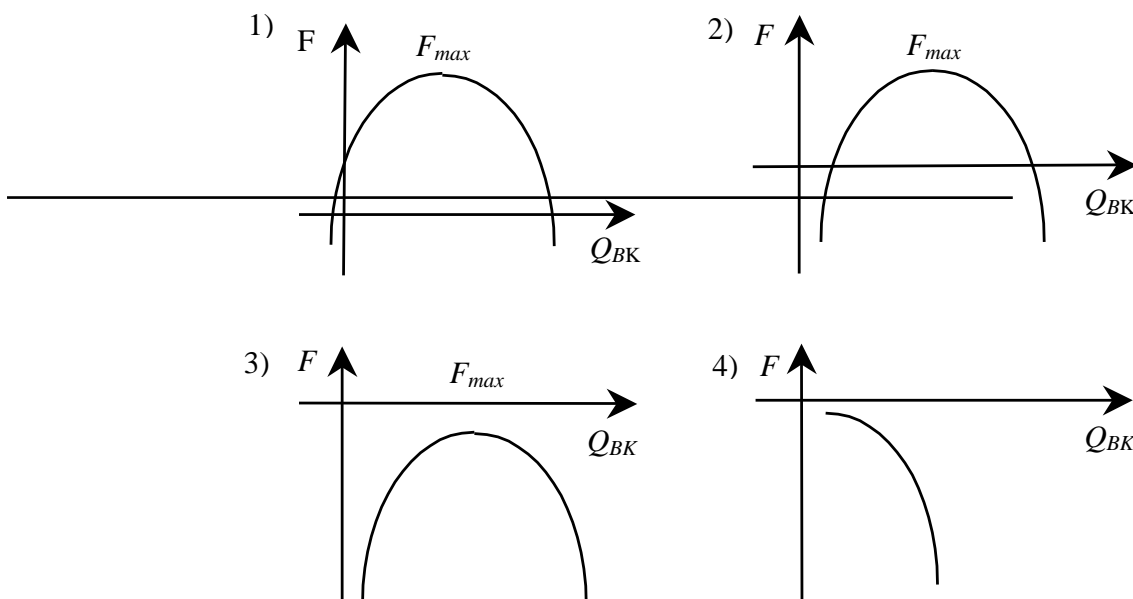
Kako troškovi instalacija u kondenzatorske baterije (koji su funkcija naponskog nivoa na kome se vrši instalacija) zavise približno linearno od instalisane snage baterije, a gubici aktivne snage (i energije) zavise od kvadrata prividne snage koja teče po elementima mreže, funkcija ušteda F ostvarena ugradnjom baterije kondenzatora Q_{BK} u neki čvor može se predstaviti krivom ušteda. U zavisnosti od toga u kom delu koordinatnog sistema (F, Q_{BK}) se nalazi ova kriva, svi čvorovi distributivne mreže mogu se podeliti u četiri grupe, sl. 5.10.

1) uštede postoje čak i za najmanje module, i rastu sa povećanjem broja modula sve dok se ne dostignu maksimalne uštede F_{max} , nakon čega uštede opadaju;

2) uštede su za najmanje module manje od nule ali rastu sa povećanjem instalisane snage kondenzatora, i svoj maksimum dostižu iznad nule;

3) uštede su negativne za najmanje module, rastu sa instalisanom snagom baterije, ali svoj maksimum dostižu ispod nule;

4) uštede su negativne za male module, ali još više opadaju sa porastom instalisane snage kondenzatora u tom čvoru.



Sl. 5.10 Klasifikacija čvorova za potrebe kompenzacije

Osnovna ideja ovog algoritma je da su svi čvorovi u kojima je fizički moguće realizovati kompenzaciju, bez obzira na njihov naponski nivo, potencijalni kandidati za ugradnju kondenzatorskih baterija. Takođe, može se zaključiti da ugradnja jednog ili više modula kondenzatora u neki čvor smanjuje efekte ugradnje baterija u ostalim čvorovima. Ovaj efekat se na sl. 5.10. manifestuje pomeranjem krive ušteda u pravcu dole-levo. Ovo praktično znači da ukoliko se neki čvor pre postupka kompenzacije ili u toku samog optimizacionog postupka našao u grupama 3 i 4, on se u sledećim iteracijama može eliminisati kao kandidat za potencijalnu lokaciju.

Algoritam koji je izabran za prikaz u ovoj analizi bazira se na ispitivanju niza varijanti ugradnje različitih instalisanih snaga kondenzatorskih baterija na različitim lokacijama. Evaluacija pojedinih varijanti vrši se višestrukim rešavanjem tokova snaga za radikalne distributivne mreže. Da bi vreme dobijanja rešenja bilo prihvatljivo, algoritam za proračun tokova snaga mora biti izuzetnih performansi. Stoga je u ovom pristupu iskorišćen dobro poznat metod, detaljno opisan u delu analize koji se bavi tokovima snaga, koji je u smislu modelovanja modifikovan uvođenjem različitih modela potrošača.

Po učitavanju informacija o potrošnji krajnjih potrošača, konfiguraciji i parametrima mreže i ekonomskim parametrima optimizacije, primenom algoritma za tokove snaga u radikalnim mrežama, vrši se proračun komponenata kriterijumske funkcije za nekompenzovani sistem :

P_{max}^0 - vršna vrednost aktivne snage (na godišnjem nivou) za nekompenzovani sistem;

$W_{a,j}^0$ - gubici aktivne energije segmenta j za nekompenzovani sistem ($j = 1, 2, \dots, T$);

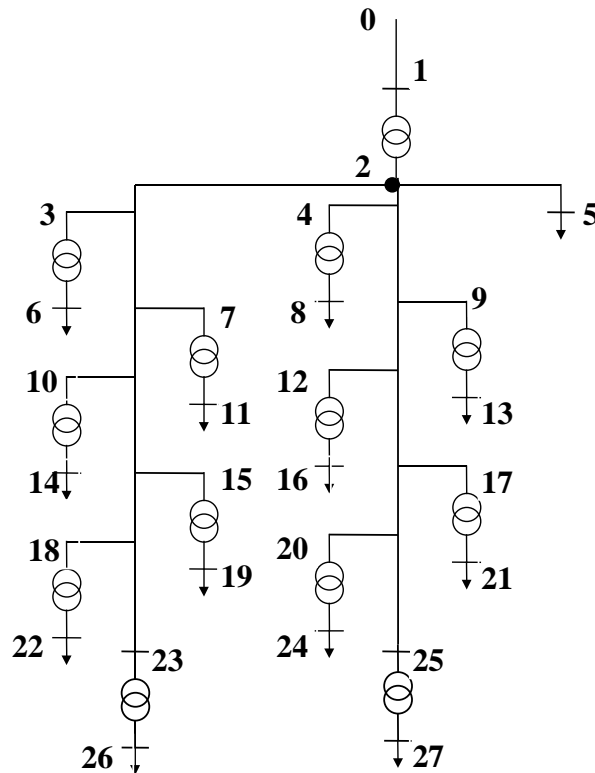
$W_{ppr,j}^0$ - prekomerno preuzeta reaktivna energija segmenta j nekompenzovanog sistema ($j = 1, 2, \dots, T$) (iako troškovi prekomerno preuzete reaktivne energije nisu element funkcije cilja, ipak je neophodno proračunati ovu energiju pri nekompenzovanom sistemu kako bi se u konačnom proračunu prikazale i uštede usled smanjenja ove komponente).

Nakon ovoga potrebno je izvršiti inicijalizaciju varijabli. Funkcija ušteda se postavlja na nulu, kao i broj lokacija instalisanih baterija. Kao što je već naglašeno, pre ulaska u optimizacionu proceduru *a priori* se ne sme odbaciti ni jedan čvor. To znači da će lista čvorova pogodnih za instalaciju baterija kondenzatora sadržati sve čvorove mreže (Lista(i), $i=1, 2, \dots, NLST$).

Dalja procedura odvija se iterativno. U svakoj iteraciji proračunavaju se efekti ugradnje jednog ili više kondenzatorskih modula u svaki čvor iz liste pogodnih (Lista(i)). Polazeći od jednog modula (ukoliko u posmatranom čvoru u prethodnim iteracijama nije ugrađen nijedan modul) ili od N_M+1 modula (ukoliko je u prethodnim iteracijama u taj čvor već ugrađeno N_M modula) vrši se proračun relativnih efekata kompenzacije F/Q_{BK} i povećanje broja modula sve dok ova funkcija raste ili dok instalisana snaga baterija ne premaši reaktivnu potrošnju u posmatranom čvoru. Ovde je učinjeno opredeljenje da umesto apsolutnih ušteda, kriterijum za izbor optimalnih lokacija u svakoj iteraciji budu relativne uštede (N.J./kVAr). Naime, u uslovima uvođenja ograničenja prekompenzacije čvorova, model bi favorizovao lokacije u koje je moguće instalirati veoma velike instalisane snage, koje se po pravilu nalaze na 10 kV i 35 kV naponskom nivou. Kako ugradnja baterije u neki čvor mreže pogoršava uslove ugradnje u preostalim čvorovima, time bi se, i pored znatno bržeg porasta funkcije cilja iz iteracije u iteraciju, relativno brzo ušlo u zasićenje, pa bi konačan optimum bio lošiji od onog koji se dobija primenom predloženog postupka.

Ukoliko se konstatuje da ugradnja modula u čvor Lista(i) u n -toj iteraciji ne donosi korist (ili čak pravi štete sa ekonomske tačke gledišta) takav čvor se izbacuje iz liste pogodnih, pri čemu se broj pogodnih čvorova umanjuje za jedan. Na ovaj način se prolaskom kroz sve pogodne čvorove nalazi onaj u kome kompenzacija daje najbolje relativne ekonomske efekte. Kako ugradnja velikih instalisanih snaga kondenzatorskih baterija u neki čvor drastično menja strujno-naponsku sliku posmatrane mreže, a time i uslove ugradnje baterija kondenzatora u ostalim čvorovima, usvojen je pristup postepenog povećanja kompenzacije. Naime u čvoru, koji se u tekućoj iteraciji pokazao kao najpovoljniji za kompenzaciju, snaga instalisanih baterija kondenzatora se povećava samo za jedan modul i ponovo se vrši pregled cele mreže (odnosno liste pogodnih čvorova). Ovaj deo optimizacione procedure završava se onda kada je lista pogodnih čvorova prazna, odnosno kada nema izgleda da će funkcija ušteda biti povećana na ovaj način.

Kako se ugradnjom kondenzatorskih baterija u čvorove distributivne mreže menjaju vrednosti napona i struja u mreži, a time i prilike za ugradnju baterija u druge čvorove, po završetku prvog optimizacionog ciklusa pristupa se relokaciji već postavljenih baterija. Ideja relokacije je da se proverí opravdanost izbora lokacija za kompenzaciju dobijenih u okviru prvog optimizacionog ciklusa. Polazeći od prvog čvora u kome je locirana baterija kondenzatora i krećući se ka poslednjem čvoru iz skupa izabranih za kompenzaciju, vrši se sledeće ispitivanje. Kompenzacija koja je postojala, nakon prvog dela optimizacije u nekom čvoru, privremeno se ukine, a zatim se pokušava pronaći novi čvor sa pogodnijom lokacijom u kome bi instalacija isključene ili neke druge instalisane snage kondenzatora, dala bolje ekonomske efekte. Ovaj postupak traje sve dok postoje poboljšanja kriterijumske funkcije.



Sl. 5.11 Ilustracija formiranja vertikalne matrice incidencije na distributivnoj test-mreži

Razvijena metodologija može se opisati sledećim koracima:

KORAK 1 : Formiranje vertikalne matrice incidencije

Za bilo koju radijalnu distributivnu mrežu može se formirati matrica koja sadrži informacije o incidenciji elementata mreže (dimenzija : (broj čvorova) x (broj nivoa)). Vrsta i sadrži informacije o putanji od čvora i do korenog čvora 0. Za test mrežu prikazanu na sl. 5.11 prikazane su vrste ove matrice koje odgovaraju čvorovima 21 i 23:

21. red	0	1	2	4	9	12	17	21	/
23. red	0	1	2	3	7	10	15	18	23

KORAK 2 : Efekti instalacije kondenzatora u jednom čvoru posmatrane distributivne mreže

Primenom algoritma za proračun tokova snaga u radijalnim distributivnim mrežama, [12], mogu se odrediti vrednosti pojedinačnih komponenti kriterijumske funkcije (5.33) za svaki čvor i , variranjem instalisane snage baterije kondenzatora u njemu:

$$\Delta P_{max}(Q_i), \Delta W_{a,t}(Q_i), IK(Q_i)$$

Zavisnost smanjenja godišnje vršne snage, $\Delta P_{max}(Q_i)$, i smanjenje gubitaka aktivne energije, $\Delta W_{a,t}(Q_i)$, od instalisane snage kondenzatorske baterije u nekom čvoru, Q_i , može se modelovati kvadratnom funkcijom:

$$\begin{aligned} \Delta P_{max} &= a_{m,t} Q_i^2 + b_{m,t} Q_i \\ \Delta W_{a,t} &= a_{t,i} Q_i^2 + b_{t,i} Q_i \end{aligned} \quad t = 1, \dots, N_S \quad (5.34)$$

Teorijski dokaz za validnost prethodnih kvadratnih jednačina teško je izvesti, zbog teškoća analitičkog rešavanja sistema nelinearnih jednačina, ali se njihova primena na velikom broju realnih i test distributivnih mreža pokazala korektnom.

Aktuelizovani troškovi, IK , mogu se iskazati preko linearne zavisnosti od instalisane snage baterije kondenzatora:

$$IK = p_a (C_F^{NN(i)} + C_V^{NN(i)} Q_i) \quad (5.35)$$

Koeficijenti $a_{m,i}, b_{m,i}$ i $a_{t,i}, b_{t,i}$ mogu se odrediti primenom tehnike minimuma kvadrata odstupanja. Iz jednačina (5.34) i (5.35) i iz definicije kriterijumske funkcije mogu se odrediti ekvivalentni koeficijenti smanjenja godišnje vršne snage i gubitaka aktivne energije za svaki čvor i .

$$\begin{aligned}
a_i &= c_{P_{max}} a_{m,i} + c_{W_a} \sum_{t=1}^{N_s} a_{t,i} \\
b_i &= c_{P_{max}} b_{m,i} + c_{W_a} \sum_{t=1}^{N_s} b_{t,i}
\end{aligned} \tag{5.36}$$

U (5.34-36) t je tekući indeks za vremenski segment (N_s je ukupan broj segmenata). Smisao indeksa m u koeficijentima $a_{m,i}$ i $b_{m,i}$ jeste da ukaže na povezanost ovih koeficijenata sa maksimalnom snagom.

KORAK 3 : Procena efekata ugradnje kondenzatorskih baterija

Prethodnim korakom (određivanjem ekvivalentnih koeficijenata za sve čvorove mreže) stvoreni su preduslovi za procenu efekata ugradnje kondenzatorskih baterija na proizvoljnom broju lokacija i proizvoljnih instalisanih snaga. Ideja o modelu za procenu ovih efekata može se najlakše objasniti na primeru dve lokacije. Pretpostavi se da su u čvorovima k i m posmatrane distributivne mreže instalisane kondenzatorske baterije snaga Q_k i Q_m , respektivno. Neka čvor $z(k,m)$ predstavlja prvi zajednički čvor na putanjama $(k-0)$ i $(m-0)$ stabla grafa (podaci o ovim čvorovima mogu se naći u vertikalnoj matrici incidencije). Uštede ostvarene ugradnjom kondenzatorskih baterija mogu se veoma dobro proceniti sledećom relacijom:

$$\begin{aligned}
U\check{S}T(Q_k, Q_m) &= (a_k Q_k^2 + b_k Q_k) + (a_m Q_m^2 + b_m Q_m) - \\
&- p_a (C_F^{NN(k)} + C_V^{NN(k)} Q_k) - p_a (C_F^{NN(m)} + C_V^{NN(m)} Q_m) - \\
&- (a_{Z(k,m)} Q_k^2 + b_{Z(k,m)} Q_k) - (a_{Z(k,m)} Q_m^2 + b_{Z(k,m)} Q_m) + \\
&+ (a_{Z(k,m)} (Q_k + Q_m)^2 + b_{Z(k,m)} (Q_k + Q_m)) = \\
&= (a_k Q_k^2 + b_k Q_k) + (a_m Q_m^2 + b_m Q_m) - \\
&- p_a (C_F^{NN(k)} + C_V^{NN(k)} Q_k) - p_a (C_F^{NN(m)} + C_V^{NN(m)} Q_m) + \\
&+ 2a_{Z(k,m)} Q_k Q_m
\end{aligned} \tag{5.37}$$

Član $2a_{Z(k,m)} Q_k Q_m$ odgovara korekciji koja predstavlja razliku između algebarskog zbira ušteda ostvarenih pojedinačnom kompenzacijom i realnih ušteda. Uopštavanjem ideje na slučaj NL lokacija dobija se sledeći izraz:

$$U\check{S}T \approx \sum_{i=1}^{NL} [a_i Q_i^2 + b_i Q_i - p_a (C_F^{NN(i)} + C_V^{NN(i)} Q_i)] + 2 \sum_{i=1}^{NL} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{NL} a_{Z(i,j)} Q_i Q_j \tag{5.38}$$

Na ovaj način definisana analitička forma omogućava određivanje optimalnih instalisanih snaga kondenzatorskih baterija koje za zadate lokacije ugradnje daju maksimum kriterijumske funkcije. Diferenciranjem relacije (5.38.) po nepoznatim instalisanim snagama dobija se:

$$\frac{\partial U\check{S}T}{\partial Q_i} = 2a_i Q_i + b_i + 2 \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{NL} a_{Z(i,j)} Q_j \right] - p_a C_V^{NN(i)} = 0 \quad i = 1, \dots, NL \tag{5.39}$$

Relacija (5.39) može se predstaviti i u matricnom obliku:

$$\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} a_1 & a_{Z(1,2)} & \dots & a_{Z(1,NL)} \\ a_{Z(1,2)} & a_2 & & a_{Z(2,NL)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{Z(1,NL)} & a_{Z(2,NL)} & \dots & a_{NL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_{NL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (p_a C_V^{NN(1)})/2 - b_1/2 \\ (p_a C_V^{NN(2)})/2 - b_2/2 \\ \dots \\ (p_a C_V^{NN(NL)})/2 - b_{NL}/2 \end{bmatrix} \tag{5.40}
\end{aligned}$$

Rešavanjem skupa linearnih jednačina (5.40) određuju se optimalne snage kondenzatorskih baterija. Vrednost procenjenih ušteda može se proračunati zamenom ovih snaga u jednačinu (5.38).

5.7.4. Karakterističan ilustrativni primer kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama

U cilju ilustracije predložene metodologije biće prikazana njena primena na test primeru distributivne mreže sa sl. 5.11. Podaci o radikalnoj mreži dati su u tabeli 5.2. U ovoj tabeli dati su podaci o rednim brojevima i naponskim nivoima čvorova, rednim brojevima neposredno gornjih čvorova, parametrima elemenata (vodova ili transformatora) između posmatranog i gornjeg čvora, kao i instalisana snaga, ukoliko je element transformator.

Tabela 5.2 Podaci o distributivnoj test mreži

Broj čvora	U_n [kV]	gornji čvor	R [Ω]	X [Ω]	B [10^6 S]	S_n [kVA]
0	35,0	-	-	-	-	-
1	35,0	0	3,19	3,67	31,3	-
2	10,0	1	0,77	10,0	0,0	10000
3	10,0	2	1,12	0,75	6,1	-
4	10,0	2	1,12	0,75	6,1	-
5	10,0	2	1,12	0,75	6,1	-
6	0,4	3	1,35	5,85	0,0	1000
7	10,0	3	1,12	0,75	6,1	-
8	0,4	4	2,88	9,38	0,0	630
9	10,0	4	1,12	0,75	6,1	-
10	10,0	7	1,12	0,75	6,1	-
11	0,4	7	2,88	9,58	0,0	400
12	10,0	9	1,12	0,75	6,1	-
13	0,4	9	2,88	9,58	0,0	400
14	0,4	10	2,88	9,38	0,0	630
15	10,0	10	1,12	0,75	6,1	-
16	0,4	12	1,35	5,85	0,0	1000
17	10,0	12	1,12	0,75	6,1	-
18	10,0	15	1,12	0,75	6,1	-
19	0,4	15	2,88	9,38	0,0	630
20	10,0	17	1,12	0,75	6,1	-
21	0,4	17	2,88	9,38	0,0	630
22	0,4	18	1,35	5,85	0,0	1000
23	10,0	18	1,12	0,75	6,1	-
24	0,4	20	2,88	9,38	0,0	630
25	10,0	20	1,12	0,75	6,1	-
26	0,4	23	1,35	5,85	0,0	1000
27	0,4	25	1,35	5,85	0,0	1000

Osim potrošača koji se nalazi u čvoru 5 i koji energiju preuzima na 10 kV naponskom nivou (sa konstantnom godišnjom potrošnjom u svim segmentima od 1040 kW + j 416 kVAR), ostali potrošački čvorovi modelovani su sa sekundarne strane TS 10/0,4 kV/kV. Godišnji dijagram opterećenja ovih potrošača podeljen je na segment vršnog sata i dva polugodišnja segmenta, pri čemu su aktivna i reaktivna opterećenja u funkciji nominalne snage transformatora dati u tabeli 5.3. U ovoj tabeli su date i informacije o vrednosti napona napojnog čvora (čvora 0) za pomenute segmente.

Podaci o fiksnim i varijabilnim cenama kondenzatorskih baterija za naponske nivoe prisutne u test mreži dati su u tabeli 5.4. Ukupna cena instalacije kondenzatorske baterije u čvoru i koji se nalazi na naponskom nivou $NN(i)$, dobija sa na osnovu sledećeg izraza.

$$C_F^{NN(i)} + C_V^{NN(i)} Q_i \quad (5.41)$$

Ekonomski parametri neophodni za proračun efekata kompenzacije su:

- ekvivalentna cena vršnog opterećenja: $C_{P_{max}} = 150$ N.J./kW ,
- ekvivalentna cena gubitaka aktivne energije: $C_{W_a} = 0,05$ N.J./kWh i
- stopa aktualizacije: $p_a = 0,09$.

Nakon primene predložene metodologije dobijeni su rezultati za optimalne lokacije i instalisane snage kondenzatorskih baterija date u tabeli 5.5, uz ukupnu ostvarenu uštedu od 30474 N.J.

Tabela 5.3 Godišnji dijagrami opterećenja

	vršni sat	segment 1	segment 2
--	-----------	-----------	-----------

$P + jQ$	(0,80+j0,15)	(0,60+j0,16)	(0,50+j0,18)
U_0 [r.j]	1,03	1,03	1,00
trajanje [h]	1	4344	4416

Tabela 5.4 Cene kondenzatorskih baterija

NN [kV]	C_F^{NN} [N.J.]	C_V^{NN} [N.J./kVAr]
35,0	20000	10
10,0	15000	10
0,4	1000	10

Tabela 5.5 Optimalne lokacije i instalisane snage baterija

čvor	5	6	8	14	16	22	24	27
Q_i [kVAr]	500	200	120	40	200	340	80	160

5.7.5. Osnovi tehničko-ekonomske analize

Postoji više ekonomskih metoda za izbor optimalnog načina investiranja ili za izbor najekonomičnijeg tehničkog rešenja. Ovde će kratko biti prikazana metoda sa kumulativnim (ukupnim) aktualizovanim godišnjim troškovima u toku veka eksploatacije.

Različiti planerski zadaci u EES (npr. planiranje optimalne ugradnje kondenzatorskih baterija ili planiranje razvoja distributivnih mreža) vrše se na nekom dužem vremenskom horizontu (npr. 20 godina) pa je potrebno izvršiti svođenje godišnjih troškova (koji se po pravilu javljaju u različitim godinama zbog etapnosti izgradnje) na jednu zajedničku godinu. Ovo je potrebno iz razloga poređenja mogućih varijanti s ciljem da se nađe optimalna varijanta. Svođenje godišnjih troškova vrši se najčešće na početnu godinu vremenskog horizonta planiranja, mada svođenje može da se izvrši na bilo koju godinu u prošlosti ili budućnosti. Naravno, za sve potencijalne varijante razvoja svođenje se vrši na istu godinu jer samo tada ima smisla poređenje pojedinih varijanti. Proces svođenja troškova na određenu godinu naziva se aktualizacija troškova. Aktualizacija troškova vrši se preko stope aktualizacije, p_a , koja se često u literaturi zove profitnom stopom (stopom dobiti) ili stopom efektivnog dodatnog ulaganja kapitala. Ukupni godišnji troškovi bilo objekta u EES-u ili njegovih elemenata, T_g , mogu se prikazati kao:

$$T_g = p_g K + T_g^{gub} \quad (5.42)$$

Prvi sabirak na desnoj strani predstavlja deo godišnjih troškova srazmeran ulozenom kapitalu (investicijama), K , a koeficijent srazmere je jednak godišnjoj stopi, p_g , koja je veća od stope aktualizacije p_a za iznose godišnjih stopa amortizacije p_{am} i održavanja p_o :

$$p_g = p_a + p_{am} + p_o \quad (5.43)$$

Drugi sabirak na desnoj strani jednačine (5.42) predstavlja godišnje troškove gubitaka, T_g^{gub} , koji će biti detaljno analizirani kasnije.

Ako se aktualizacija godišnjih troškova, datih sa (5.42), vrši na početnu godinu planiranja, tada su ukupni, aktualizovani troškovi za određeni objekat, $T_{\Sigma a}$ odnosno element EES-a, dati izrazom:

$$T_{\Sigma a} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + p_a} \right)^i \left[(p_a + p_{am} + p_o) K + T_i^{gub} \right] \quad (5.44)$$

Iz (5.44) se vidi da se godišnji troškovi gubitaka menjaju iz godine u godinu i da su u i -toj godini specificirani na način kako će biti naknadno objašnjeno. U izrazu (5.44) sa n je označen broj godina vremenskog horizonta planiranja.

Svođenje godišnjih troškova može se vršiti i na kraj perioda eksploatacije objekta ili na neku drugu godinu koja je od interesa u analizi efektivnosti investiranja. Treba istaći da se svođenja vrše uvek sa stopom aktualizacije p_a , a ne sa godišnjom stopom p_g . Razlog je što je osnovna definicija godišnjih troškova data kao zbir dva člana. Prvi član je $p_a K$, a u drugom članu figurišu zajedno svi ostali godišnji troškovi (godišnji troškovi gubitaka i održavanja, koji čine troškove eksploatacije, i godišnji troškovi amortizacije). Formalnim uvođenjem proporcionalnosti između ulozenog kapitala i troškova održavanja i amortizacije dobija se uvećana stopa p_g , prema relaciji (5.43). Međutim, svođenje godišnjih troškova se i dalje mora vršiti preko stope aktualizacije p_a , jer je samo ova stopa direktno, odnosno stvarno vezana za kapitalna ulaganja, dok su sve ostale korelacije sa kapitalnim ulaganjima indirektno i formalne prirode.

Prethodna razmatranja i analiza strukture godišnjih troškova pokazuju da se njihov deo koji nije u vezi sa gubicima sastoji od godišnjih troškova kapitala, član $p_a K$, godišnjih troškova amortizacije, član $p_{am} K$, i godišnjih troškova održavanja, član $p_o K$. Ova tri člana su grupisana zajedno preko uvođenja godišnje stope p_g . Član $p_a K$, proizvod stope aktualizacije p_a i investicionih ulaganja u pojedini objekat K , predstavlja deo fiksnih godišnjih troškova i može se shvatiti kao dodatni trošak kapitala u smislu da novčani kapital pored svoje reprodukcije donosi, odnosno može da donose kamatu, a da robni kapital donosi,

odnosno može da donese prosečnu dobit ("oplodnja kapitala"). Ekonomski smisao člana $p_a K$ je taj da on nije ništa drugo nego prema uloženoj kapitalu srazmeran prosečan višak vrednosti, odnosno prosečna novostvorena godišnja vrednost. U smislu "troškova" može se dati interpretacija da se odvlačenjem kapitala na dati objekat gubi prosečna godišnja vrednost $p_a K$. Prema tome stopa aktualizacije (dobiti) predstavlja srazmeru ovih troškova u odnosu na investicije u objekat.

Vrednost stope aktualizacije zavisi od mnogih ekonomskih kategorija kao što su: kamatna stopa, inflacija, stepen razvijenosti ekonomije, način organizacije elektroprivrede itd. Stopa aktualizacije mora biti veća od kamatne stope i za elektroenergetske analize obično se usvaja vrednost od 9% (0,09). Stopa aktualizacije je stopa kojom se vrši svođenje godišnjih troškova u toku perioda planiranja na zajedničku godinu.

Procenat prenete vrednosti osnovnih sredstava za jednu godinu predstavlja amortizacionu stopu. Stopa amortizacije može se definisati kao statička amortizaciona stopa preko koje bi se (odnosno stvaranjem amortizacionog statičkog fonda) za procenjeni životni vek objekta (odnosno na kraju tog životnog veka) obezbedila ista novčana sredstva kao što je investiciona vrednost objekta. Ovakvim pristupom ne uzima se u obzir plasman sredstava amortizacije, sukcesivno kako pristižu iz godine u godinu, u druge objekte ili u druge poslove, koja bi donosila istu stopu dobiti, i zato je potrebno izvršiti preračunavanje na dinamičku ili realnu stopu amortizacije.

Stopa amortizacije ima za cilj da valorizuje godišnje troškove usled amortizacije. Amortizacija predstavlja otpisivanje, odnosno umanjenje vrednosti nekog elementa sa vremenom. Svaki element elektroenergetskog sistema ima svoj životni vek i tokom tog životnog veka vrednost elementa iz godine u godinu je sve manja. Životni vek se tipično za elemente EES-a kreće od 15 do 40 godina.

Šema amortizacije je algoritam otpisivanja vrednosti elementa čiji je vremenski interval jednak životnom veku elementa. Postoji nekoliko šema amortizacije. Statička (pravolinijska) šema amortizacije je šema gde se u svakoj godini otpisuje ista vrednost. Statička amortizaciona stopa bi bila ona koja omogućava da se na kraju životnog veka objekta izvrši nabavka (izgradnja) novog, pomoću sredstava sakupljenih odvajanjem (svake godine istog iznosa) u amortizacioni fond u kome se sredstva ne angažuju već miruju. Stopa amortizacije kod statičke šeme izračunava se preko izraza:

$$p_{am} = \frac{1}{T_v}, \quad (5.45)$$

gde je T_v amortizacioni vek elementa.

U praksi se obično radi sa ravnomernom šemom amortizacije ali se koristi dinamička, realna stopa amortizacije, koja se izračunava preko formule:

$$p_{am} = \frac{p_a}{(1 + p_a)^{T_v} - 1} \quad (5.46)$$

Računanje amortizacione stope na dinamički način obuhvata efektivno korišćenje sredstava iz amortizacionog fonda pomoću stope aktualizacije, tokom svake godine životnog veka objekta.

Naravno, statička stopa ($1/T_v$) je veća od realne stope amortizacije. Zbog toga se za $T_v = 25$ godina dobija da statička stopa amortizacije iznosi 4%, dok se za dinamičku, pri stopi aktualizacije od 9%, dobija vrednost od 1,18%.

Prema tome troškovi amortizacije se mogu indirektno predstaviti kao deo fiksnih godišnjih troškova i računaju se kao proizvod stope amortizacije p_{am} i investicija u objekat K .

Stopa održavanja služi da valorizuje godišnje troškove potrebne za održavanje elemenata sistema. Pod održavanjem elemenata sistema podrazumevaju se kako preventivne akcije s ciljem poboljšanja stanja elemenata tako i opravke elemenata u kvaru. Od preventivnih akcija, primera radi, mogu se napomenuti povremene provere trasa nadzemnih vodova. Tu se pre svega misli na proveru stanja stubova, zatim uklanjanje rastinja ispod trase itd.

Elementi sistema, generatori, transformatori, vodovi i drugi, imaju različite stope održavanja s tim da rotacioni elementi imaju najveće stope održavanja. Potrebno je ukazati da se za stope održavanja za pojedine elemente EES-a usvajaju konstantne vrednosti u toku celog životnog veka elementa. Drugim rečima pretpostavljaju se isti godišnji troškovi održavanja u toku celog vremenskog horizonta planiranja. Prema gore usvojenim oznakama godišnji troškovi održavanja indirektno se takođe mogu vezati sa investicijama i izračunavaju se kao proizvod stope održavanja p_o i investicija u objekat K .

Zbir gore pomenutih stopa, stope dobiti, stope amortizacije i stope održavanja predstavlja stopu godišnjih troškova.

Troškovi održavanja, generalno, nisu linearno proporcionalni investicijama već se uz dugotrajna istraživanja mogu formirati složene matematičke funkcije koje daju zavisnost troškova održavanja od investicija. Međutim, ukoliko ne postoje egzaktni kriterijumi, uobičajeno je da se usvoji linearna zavisnost, definisana odgovarajućom stopom održavanja. Tipične vrednosti stopa održavanja vodova, transformatora i generatora u EES-u su od 1% do 2%.

Sabirci u jednačini (5.42) mogu da se grupišu na još jedan način. Naime, prvi sabirak obuhvata godišnje troškove za angažovani kapital (investicije), troškove amortizacije i troškove usled održavanja. Ovi troškovi su nepromenljivi iz godine u godinu i zato se nazivaju konstantnim ili fiksnim troškovima. Drugi sabirak u jednačini (5.42) predstavlja godišnje troškove usled gubitaka snage. Ovi troškovi su promenljivi iz godine u godinu i zato se nazivaju varijabilnim ili promenljivim troškovima. U optimizacionom kontekstu može se rezonovati tako da su konstantni i varijabilni troškovi tegovi na preciznoj vagi ustanovljenoj objektivnom funkcijom. Forsiranje jednog od ova dva faktora vodi u neravnotežu. Jednačina (5.42) može se po potrebi proširiti i troškovima usled instalisanih kapaciteta za kompenzaciju reaktivne energije ili nekim drugim troškovima.

Potrebno je istaći da jednačinom (5.42) nije adekvatno valorizovana činjenica da se usled različitih tehničkih rešenja dobija i različit kvalitet napajanja (štete usled neisporučene, odnosno nekvalitetno isporučene električne energije), već je samo računato sa ispunjenjem tehničkih uslova.

Ako su svi godišnji troškovi, izraz u srednjoj zagradi u formuli (5.44), konstantni tokom razmatranog perioda, kumulativni (ukupni) aktualizirani troškovi dobijaju se množenjem ukupnih godišnjih troškova sa izrazom:

$$\frac{(1+p_a)^n - 1}{p_a(1+p_a)^n} \quad (5.47)$$

5.7.6. Određivanje godišnjih troškova gubitaka i ekvivalentne cene gubitaka aktivne snage i energije

Godišnji troškovi gubitaka u i -toj godini računaju se kao:

$$T_i^{gub} = c_p P_{i,max}^{gub} + c_w W_i^{gub} \quad (5.48)$$

U (5.48) je sa c_p označena jedinična cena gubitaka snage (N.J./MW), sa c_w jedinična cena gubitaka aktivne energije (N.J./MWh), sa $P_{i,max}^{gub}$ maksimalni gubici snage u i -toj godini u MW i sa W_i^{gub} gubici energije u i -toj godini u MWh.

Problem određivanja cene gubitaka snage i energije je vrlo složen i njemu treba da se posveti posebna pažnja. Naime, prilikom ekonomskog vrednovanja godišnjih gubitaka energije i snage u elementima EES-a morale bi se strogo gledano poznavati one cene za svaki izgubljeni kWh i za svaki kW maksimalne (vršne) snage gubitaka koje važe za tačku sistema u koju se vezuje analizirani element. U složenim sistemima to je praktično nemoguće i zato se u studijama distributivnih sistema koriste tarifni stavovi na pragu distribucije a u studijama prenosnih mreža oni koji važe na pragu elektrana.

Kod određivanja ekvivalentne cene gubitaka za snagu, c_p , polazi se od nalaženja dugoročnih marginalnih troškova za marginalni MW u fazi planiranja. Naime, pod pretpostavkom da u analiziranom sistemu nema gubitaka snage tada ne bi bilo potrebno graditi dodatne proizvodne (i ostale) kapacitete. Pošto gubici snage realno postoje potrebno ih je valorizovati preko cene MW kapaciteta koje je potrebno izgraditi u sistemu za potrebe razvoja sistema. U planiranju se ovi troškovi nazivaju dugoročnim marginalnim troškovima (prema njima se utvrđuju i elementi realne tarifne politike) i oni odslikavaju činjenicu da se usled porasta opterećenja u toku vremena dolazi do stanja da postojeći kapaciteti nisu dovoljni da zadovolje potrošnju. Zbog toga su potrebna ulaganja u nove proizvodne, prenosne i distributivne kapacitete. Ako se distributivno preduzeće posmatra kao nezavisni ekonomski subjekt tada je sa njegovog aspekta bitna cena snage koje ono mora da plaća prema isporučiocu energije (prema prenosu). Dakle, za razvojne studije distributivne mreže dovoljno je analizirati cenu snage na pragu distribucije (na dodiru prenosa i distribucije). Cena snage koju distributivno preduzeće plaća je određena dakle samo novim investicijama u proizvodnju i prenos. Vrednost ovih uloženi investicija izraženih u novčanim jedinicama po MW predstavlja troškove za marginalni MW u fazi planiranja. Ovi troškovi ujedno predstavljaju i cenu gubitaka snage.

Na osnovu iskustvenih podataka važno je ukazati da od ukupnih investicija potrebnih za izgradnju 1 MW kapaciteta u EES-u, na proizvodni podsistem otpada do 60 % (u zavisnosti od strukture proizvodnih kapaciteta i vrste elektrane), dok na prenosni i distributivni podsistem otpada do 40 % (na prenosni tipično nešto oko 15%).

Imajući sve ovo u vidu troškovi marginalnog MW, odnosno cena gubitaka snage sa gledišta razvoja distributivne mreže, može se u opštem slučaju izračunati pomoću izraza:

$$c_p = K^{proizv} p_g^{proizv} + K^{pren} p_g^{pren} + K^{distr} p_g^{distr} \quad (5.49)$$

gde su:

K^{proizv} , K^{pren} , i K^{distr} - investicije u proizvodne, prenosne i distributivne kapacitete, respektivno, a

p_g^{proizv} , p_g^{pren} , p_g^{distr} - godišnje stope u proizvodne, prenosne i distributivne kapacitete, respektivno.

Ako se kao primer uzme zadatak optimalne kompenzacije reaktivnih snaga tada se godišnji troškovi vršnog MW mogu izračunati po obrascu (5.49) kad se u njega ne smenjuje deo koji se odnosi na investiranje u distributivnom podsistemu. Imajući u vidu da su jedinične investicije za termoelekttranu i deo rudnika oko 1200 N.J./kW, i vodeći računa da je učešće proizvodnog dela u ukupnim investicijama u EES oko 60%, dobija se da su ukupne investicije u kapacitete oko 2000 N.J./kW. Ako se od ovog iznosa oduzme deo investicija za distributivni podsistem (oko 25%, odnosno oko 500 N.J./kW), tada ostaje oko 1500 N.J./kW kao jedinično ulaganje u proizvodni i prenosni podsistem. Sa stopom od 10% ovo bi rezultiralo u ceni snage od oko 150 N.J./kW.

Do iste ove cene snage trebalo bi se stići i ako se pođe od stvarnih cena obračunske snage u sistemu (analiza odozdo) i ako se zatim one primene na konstantne gubitke snage (gubici u gvožđu) i na promenljive gubitke snage (gubici u bakru). Analize pokazuju da je cena gubitaka snage u bakru negde oko 70% cene gubitaka u gvožđu, pošto su gubici u gvožđu u celini prisutni u maksimalnom opterećenju sistemu.

Za cenu gubitaka energije može se usvojiti zbirna jedinična cena proizvodnje i prenosa po 1 kWh, u N.J./kWh. Za cenu gubitaka energije kao realnu vrednost treba uzeti ekonomsku cenu električne energije na posmatranom mestu. Za početak 21. veka u našem okruženju, je ta cena oko 0,05 N.J./kWh (radi ilustracije cena prekomerno preuzete reaktivne energije je oko 0,01 N.J./kVArh). Iz prethodnih analiza se vidi da je 1 N.J. = 1 \$.

Pošto se elementi distributivne mreže dimenzionišu u funkciji od prenete snage, moguće je izvršiti preračunavanje troškova gubitaka električne energije i izraziti ih u troškovima gubitaka snage, odnosno izračunati ekvivalentnu cenu jedinične snage.

Gubici aktivne snage u gvožđu su uglavnom konstantni tokom godine (napon se u proseku može smatrati bliskom svojim nominalnim vrednostima). Prema tome vreme trajanja gubitaka u gvožđu je 8760 časova, pa je ekvivalentna cena gubitaka snage u gvožđu:

$$c_{P,Fe}^{ekv} = c_P + c_W \cdot 8760 \quad (5.50)$$

Gubici aktivne snage u bakru su promenljivi i vreme trajanja maksimalnih gubitaka u bakru (u termogenim otpornostima) zavisi od dijagrama opterećenja pojedinog elementa sistema. Za potrebe studija razvoja distributivnih mreža obično se usvaja da se izračunava po obrascu:

$$\tau = 0,17T + 0,83 \frac{T^2}{8760} \quad (5.51)$$

gde je T vreme trajanja maksimalnog opterećenja. Prema tome ekvivalentna cena gubitaka snage u termogenim otpornostima računa se kao:

$$c_{P,Cu}^{ekv} = c_P + c_W \tau \quad (5.52)$$

Troškovi gubitaka snage za potrebe studija planiranja razvoja mreža sada se mogu računati samo preko poznavanja ukupnih gubitaka snage u gvožđu i u bakru (bez potrebe za poznavanjem gubitaka energije) i njihovim množenjem sa jediničnim cenama prema relacijama (5.50) i (5.52).

Troškovi gubitaka snage u bakru su funkcija i faktora jednovremenosti maksimalnih snaga na različitim elementima sistema. Naime, gubici snage u distributivnoj mreži zavise i od lokacije pojedinog elementa distributivne mreže, jer gubici izazivaju i dodatne troškove u prenosnoj i distributivnoj mreži na prethodnim elementima kroz koje je energija tekla. Ovakvo posmatrana cena gubitaka najveća je u mreži 0,4 kV. Kako se maksimalni gubici u datom elementu ne moraju da pojave pri maksimalnom opterećenju sistema, to znači da za njih možda nije neophodno graditi dodatne kapacitete u izvorima (izvori u strukturi cene gubitaka najznačajnije utiču). Maksimalna opterećenja u distributivnoj mreži ne moraju da se jave kada i vršno opterećenje sistema, pa se usvoja faktor jednovremenosti f_j (obično 0.85). Sada se ukupna, ekvivalentna cena snage gubitaka u aktivnim (termogenim) otpornostima, $c_{P,Cu}^{\Sigma ekv}$ računa po obrascu:

$$c_{P,Cu}^{\Sigma ekv} = c_P f_j^2 + \tau c_W \quad (5.53)$$

Na osnovu prikazanih formula i jediničnih cena kako snage i energije tako i investicionih cena pojedinih elemenata mreže mogu se formirati kumulativni aktualizovani troškovi razvoja mreže za različite karakteristične scenarije planiranja razvoja. Postupkom minimizacije troškova određuje se optimalna varijanta prema kojoj se planira dalji razvoj mreže.

6. Proračuni kratkih spojeva

Kratak spoj predstavlja poremećeno stanje mreže, odnosno poremećeno stanje EES-a. U mrežama se za vreme trajanja kratkog spoja detektuju enormno velike vrednosti struja. Kratak spoj se dešava kad dođe do fizičkog kontakta ili do preskoka (kratak spoj preko luka) između delova kola koji su u normalnom radnom stanju na različitim potencijalima. Tipična slika je dodir faznog provodnika sa potencijalom zemlje ili dodir dva fazna provodnika međusobno. Ako se radi o direktnom metalnom kontaktu dva provodnika tada se izjednačavaju njihovi potencijali, a ako do kontakta dolazi preko luka tada se ima neki relativno mali pad napona na impedansi luka. Do kratkog spoja u generatoru dolazi ili zbog proboja izolacije između navojaka ili zbog kontakta namotaja i metalnih delova generatora koji su na potencijalu zemlje. Slična situacija je i za transformatore. Kratki spojevi se javljaju ili zato što je izolacija ostarila ili zato što je oslabljena zbog delovanja prenapona. Kod nadzemnih vodova do kratkih spojeva dolazi zbog raznih uzroka kao što su delovanje groma, vetra, pad grana (drvo) na provodnike, zbog ptica ili drugih uticaja (kranovi, helikopteri, avioni). Zaprljanost izolacije i loše vremenske prilike kombinovane sa prenaponima (spoljnog ili unutrašnjeg porekla) po pravilu mogu da dovedu do kratkih spojeva. Kod kablova do kvarova dolazi ili usled slabljenja odnosno starenja izolacije ili usled mehaničkih oštećenja. Proračuni kratkih spojeva mogu se realizovati kao proračuni stacionarnih stanja ili kao proračuni prelaznih stanja. U okviru analize EES kratki spojevi se dominantno proučavaju kao kvazistacionarna stanja, odnosno kao nazovi stacionarna stanja. Pošto se po prirodi stvari stvarne struje i naponi za vreme trajanja kratkog spoja menjaju sa vremenom, to onda sledi da je u cilju dobijanja kompletne kvazistacionarne predstave potrebno iz ove stvarne slike napona i struja za vreme trajanja kratkog spoja izdvojiti nekoliko stacionarnih stanja, odnosno *zamrznuti* ova odabrana karakteristična stanja nekoliko puta, a dalje se slaganjem tih stanja jednog do drugog može da rekonstruiše kompletna slika. Vreme je na taj način elegantno isključeno iz ovog problema, pa se fazorski račun može primenjivati bez teškoća. Oscilogrami struja kvara pokazuju da je dovoljno odabrati samo tri karakteristična stanja koja se odnose na subtranzijentni, tranzijentni i ustaljeni period kratkog spoja.

Prilikom proučavanja kratkih spojeva kao prelaznih procesa ispisuju se diferencijalne jednačine i računa se vremenski tok napona i struja kvara.

6.1. Značaj proračuna struja kratkih spojeva

Proračuni kratkih spojeva, odnosno preciznije proračuni struja i napona u sistemu za vreme trajanja kratkih spojeva, spadaju u osnovne proračune u analizi elektroenergetskih sistema, i neposredno su po značaju iza proračuna tokova snaga. U osnovi se ovde radi o graničnim režimima koje treba proučiti i prema njima dimenzionisati sistem i elemente sistema. Između mnogo važnih informacija koje su potrebne na osnovu proračuna kratkih spojeva posebno su važne udarne struje kratkog spoja prema kojima se vrši proračun elektrodinamičkih sila, odnosno koje su merodavne za izbor opreme. Ove struje se proračunavaju prema intenzitetu struja u subtranzijentnom periodu. Druga grupa informacija od interesa su termička naprezanja opreme i pojedinih komponenti u sistemu. Subtranzijentni period je suviše kratak da bi toplotni efekti došli do izražaja, pa je za termičke proračune merodavan tranzijentni period. Prema tome, dimenzionisanje opreme na termička naprezanja vrši se prema toplotnom impulsu koji se određuje na osnovu tranzijentne struje i odgovarajućih vremena trajanja ovih struja. U tranzijentnom periodu se uglavnom vrši i prekidanje struje kvara, pa se i dimenzionisanje ključnih elemenata prekidača vrši na osnovu veličina proračunatih u ovom periodu. Isto tako i problem dimenzionisanja uzemljenja i uzemljivača, kao vrlo značajan u sistemima, se rešava na osnovu proračunatih vrednosti struja jednofaznog kratkog spoja u tranzijentnom periodu. Veličina ovih struja određuje i način uzemljenja zvezdišta, pa se ceo kompleks ovih pitanja može formulisati i kao tretman zvezdišta, odnosno neutralne tačke u sistemu u vezi sa veličinom struja jednofaznog kratkog spoja u tranzijentnom periodu. Kroz uzemljivač, odnosno kroz povratni provodnik u zemlji, teče trostruka nulta struja, koja je pri jednofaznom kratkom spoju sa zemljom jednaka struji faze pogođene kvarom. Prema tome, samo se pri nesimetričnim kvarovima sa zemljom javlja struja kroz povratni provodnik u zemlji (odnosno kroz uzemljivač) i jednofazni kratki spoj sa zemljom se uzima kao reprezent ovih kvarova.

Inženjerski proračuni struja kratkih spojeva se po pravilu vrše sa uprošćenjima koja daju rezultate na stranu sigurnosti. Drugim rečima, proračunate struje kvara su sigurno veće od struja kvara koje se imaju u realnom sistemu. Međutim, zadaci dimenzionisanja relejne zaštite i odgovarajuće automatike su vrlo zahtevni u smislu egzaktnosti ulaznih informacija o strujama i naponima za vreme trajanja kvara. Tako se može desiti da se za pravilno dimenzionisanje elemenata relejne zaštite mora raspolagati sa vrlo rigoroznim informacijama, pa su ovi proračuni po strogosti i najzahtevniji.

Elektromagnetni uticaj elektroenergetskih vodova na okolinu takođe je u osnovi određen sa tranzijentnim periodom kvara. Naime, u normalnim, simetričnim radnim stanjima, pa naravno i pri simetričnim poremećenim stanjima (slučaj trofaznog kratkog spoja) elektroenergetski vod nema uticaja na druge paralelne komunikacione ili infrastrukturne sisteme. Poznato je da tri simetrična vektora sa jednakim intenzitetima, pomerena za po 120° , kao rezultantu daju nulu, odnosno spoljni posmatrač ih ne registruje. Međutim, pri nesimetričnim radnim ili poremećenim stanjima ovi vodovi imaju vrlo jak uticaj na okolinu i ovaj uticaj se proverava na reprezentativnu nesimetriju, na slučaj jednofaznog kratkog spoja u tranzijentnom periodu. Pored elektromagnetnog uticaja elektroenergetski vodovi imaju i druge uticaje na okolinu. Tako je interesantno ukazati da je elektrostatički uticaj osetno manje bitan, ali se uticaj korone kroz akustične efekte često javlja kao limit kod projektovanja nadzemnih vodova najviših napona. U poslednje vreme ni estetske aspekte uticaja nadzemnih vodova na okolinu ne treba prenebrežnuti.

Proračuni kratkih spojeva služe kao osnova i za proveru tranzijentne stabilnosti elektroenergetskih sistema. Drugim rečima, tranzijentna stabilnost se ne može uspešno proučavati bez poznavanja intenziteta struja kratkih spojeva.

Metodologija proračuna struja kratkih spojeva i odgovarajućih napona za vreme trajanja kratkog spoja, kao kvazistacionarnih veličina, bazira se na primeni teoreme superpozicije kojom se veoma elegantno prevazilaze određene metodološke teškoće. Naravno, primena superpozicije podrazumeva da se proračuni rade na linearnim sistemima.

U elektroenergetskim sistemima proračunavaju se sledeće vrste otočnih kvarova, odnosno kratkih spojeva:

- trofazni kratki spoj (k3)
- jednofazni kratki spoj sa zemljom (k1Z)
- dvofazni kratki spoj sa zemljom (k2Z)
- dvofazni kratki spoj bez zemlje (k2).

Proračuni trofaznog kratkog spoja su očividno proračuni simetričnih, dok su proračuni preostala tri otočna kvara proračuni nesimetričnih stanja. Važno je ukazati da je preko 70% kratkih spojeva kod nadzemnih elektroenergetskih mreža tipa jednofaznog kratkog spoja sa zemljom, tako da je njihov značaj najveći. Međutim, ni praktični ni metodološki razlozi ne dozvoljavaju da se bilo koja vrsta otočnih kvarova ne analizira sistematski i dovoljno egzaktno.

6.2. Primena Thevenin-ove teoreme i principa superpozicije na proračune struja kratkih spojeva

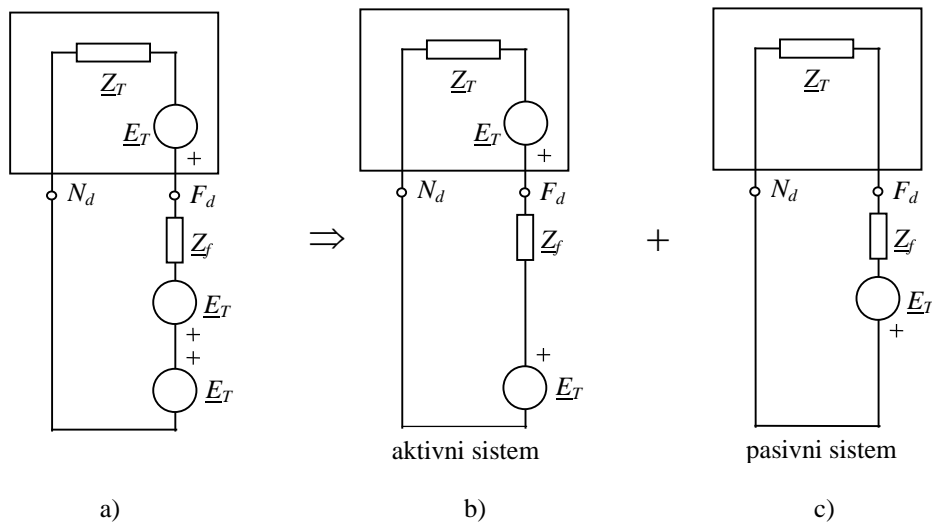
Kratak spoj u EES-u se može predstaviti kao strukturna promena u mreži, tj. može se simulirati dodavanjem neke impedanse na mestu kvara (dakle, strukturna promena mreže se dešava na mestu kvara). U suštini otočni kvar, odnosno kratak spoj, predstavlja kontakt između nekih sabirnica (ili bilo koje tačke u mreži koja je na nekom potencijalu) u sistemu i zemlje. Taj kontakt se simulira sa dve tačke (karakteristični pristupi ili krajevi za priključenje impedanse kojom se simulira kvar) i sa već pomenutom impedansom kvara, koja se postavlja između te dve tačke. Vrednost te impedanse kvara je nula, ako je u pitanju metalni trofazni kratak spoj. Ako je kvar preko luka, onda se u analizu uvodi impedansa luka kojom se mogu simulirati prilike na mestu kvara. Promene struja i napona koje su posledica ovakve strukturne modifikacije mreže, mogu se uspešno izračunavati preko primene Theveninove teoreme.

Promene struja i napona koje su posledica dodavanja neke impedanse između dva čvora mreže, su identične strujama i naponima koje bi se imale u kolu koje čine Theveninov ekvivalent mreže i ova nadodata impedansa. Theveninov ekvivalent ma kako složene mreže svodi se na rednu vezu Theveninove ems i odgovarajuće ekvivalentne Theveninove impedanse. Theveninova ems jednaka je naponu praznog hoda između dvaju karakterističnih pristupa, odnosno krajeva od interesa, a odgovarajuća ekvivalentna Theveninova impedansa je jednaka ulaznoj impedansi gledanoj odočno sa mesta kvara, odnosno ulaznoj impedansi posmatranoj u odnosu na dva karakteristična pristupa. Prilikom nalaženja ove ekvivalentne ulazne impedanse mreža se mora učiniti pasivnom.

Za izračunavanje ukupnih struja i napona za vreme trajanja kvara, kao kvazistacionarnih fazorskih veličina u subtranzijentnom ili tranzijentnom periodu, moraju se ovako izračunatim promenama superponirati struje i naponi pre kvara. Poznavanje struja i napona pre kvara se u ovoj analizi podrazumeva. U suštini se ove struje i naponi proračunavaju primenom programskih paketa za proračun tokova snaga i naponskih prilika u složenim elektroenergetskim mrežama. Dakle, primenom Theveninove teoreme vrši se proračun samo promena struja i napona u mreži usled strukturne modifikacije mreže (odnosno, usled kratkog spoja do koga je došlo). Međutim, u većini proračuna upravo su ove promene odlučujuće za ukupan iznos struje kvara, pošto je doprinos radnih struja tipično negde do 10%, ako do kvara dolazi iz radnog stanja sa značajnim opterećenjem sistema. Naravno, ovaj doprinos postaje sve manji ako do kvara dolazi iz slabije opterećenih stanja i jednak je nuli ako je do kvara došlo iz stanja praznog hoda mreže.

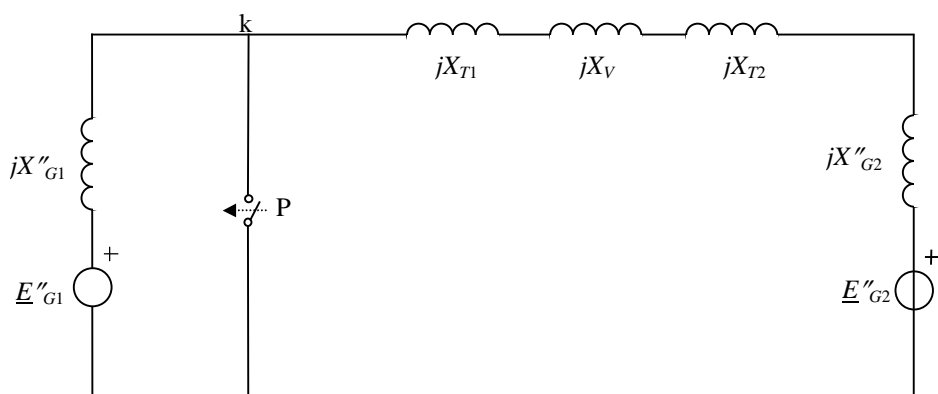
Primenu Theveninove teoreme na proračune struja kratkih spojeva moguće je interpretirati bilo na primeru simetričnih bilo na primeru nesimetričnih kvarova. Putem uvođenja impedanse Z_f (ekvivalentne impedanse kvara – *fault*, koja u sebe uključuje i fizičku impedansu kvara i ekvivalent kojim se simulira nesimetrični kvar), moguće je sve vrste otočnih kvarova interpretirati na jedinstven način.

Kratak spoj se simulira, kao što je već konstatovano, strukturnom promenom mreže, između tačaka F_d (faza direktnog redosleda) i N_d (nula direktnog redosleda), prikazanom na sl. 6.1a sa dodavanjem grane sa rednom vezom ekvivalentne impedanse kvara Z_f i dve Theveninove ems vezane u opoziciju, E_T . Koristeći princip superpozicije prethodna slika se može razložiti na dve slike. Na slici aktivnog sistema, slika pod b, dva generatora su vezana u opoziciju i daju kao rezultat nultu struju u grani sa impedansom Z_f kojom se simulira kvar. Dakle, dobija se slika normalnog radnog stanja sistema pri kojem sigurno u ovoj grani ni nema nikakve struje. U pasivnom sistemu, slika pod c, kao jedina prisutna ems ostaje Theveninova ems, usmerena ka zemlji, odnosno ka sabirnicama nultog potencijala u sistemu. Rezultat proračuna na pasivnom sistemu su promene struja, koje superponirane sa radnim strujama iz aktivnog sistema daju rezultatnu sliku kvara koja je prikazana na slici a, ili simbolički (stanje a) = (stanje b) + (stanje c).



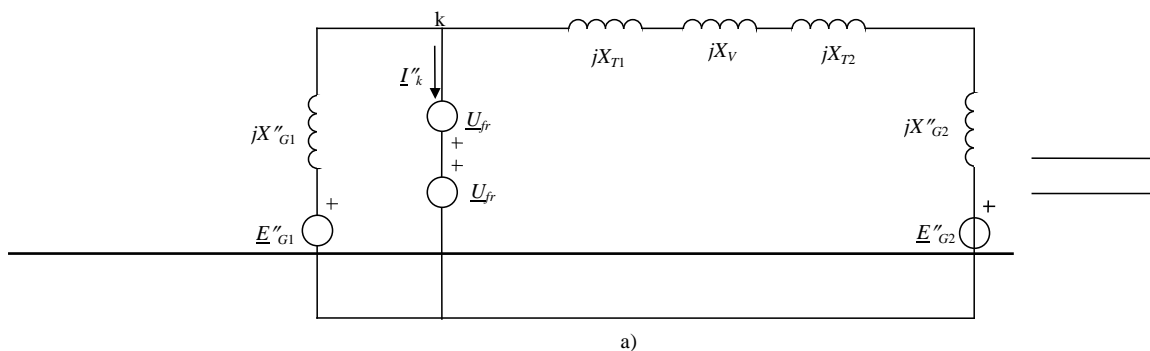
Sl. 6.1 Interpretacija teoreme superpozicije

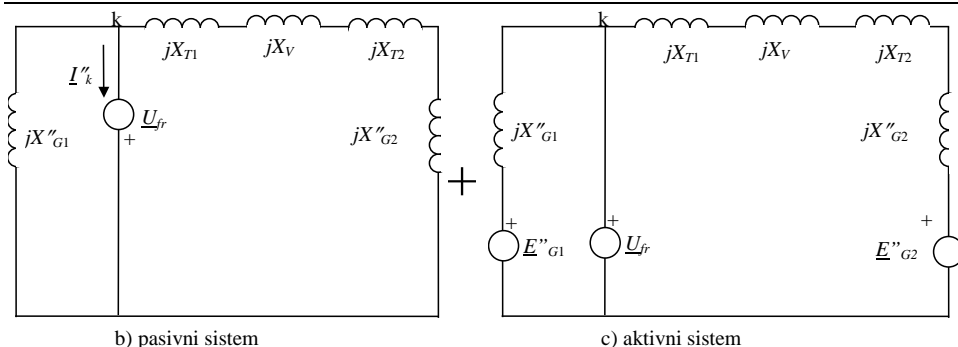
Na sl. 6.2 prikazana je, radi daljeg pojašnjenja primene Theveninove teoreme na proračune struja kratkih spojeva, ekvivalentna šema dvomašinskog elektroenergetskog sistema u subtranzijentnom periodu.



Sl. 6.2 Ekvivalentna šema dvomašinskog sistema

Generator 1 na sl. 6.2 je ekvivalentiran subtranzijentnom ems i odgovarajućom reaktansom, baš kao i generator 2. Odgovarajući generatorski transformatori su zamenjeni samo sa rednim reaktansama, a povezni vod između generatora je simuliran sa rednom reaktansom. Pretpostavlja se da će se trofazni kratak spoj (k_3) desiti u tački k , što je na slici ilustrirano eventualnim zatvaranjem prekidača P . Naravno, pri stanju sa otvorenim prekidačem P ima se normalno radno stanje.





Sl. 6.3 Interpretacija primene teoreme superpozicije na primeru dvomašinskog sistema

Kratak spoj se na sl. 6.3a, simulira sa dva generatora koji su vezani u opoziciju. Na slikama b i c izvršeno je razlaganje rezultantnog stanja za vreme trajanja kvara (stanje a), na dva stanja. Stanje prikazano na slici b odgovara pasivnom stanju prema kome se izračunavaju promene struja i napona, dok stanje c odgovara normalnom radnom stanju (aktivan simetrični sistem). Smisao idealnog naponskog generatora na slici c je da samo potvrdi potencijal tačke k, tako da kroz tu granu i nema struje u normalnom radnom stanju. Superpozicija slika na šemama b i c daje naravno stanje na šemi a, odnosno sliku za vreme kvara.

Na prethodnim slikama prikazane su jednofazne ekvivalentne šeme koje mogu poslužiti i za formiranje Theveninovog ekvivalenta u subtranzijentnom ili tranzijentnom periodu kvara. Zadatak se svodi na to da se gledano odočno sa mesta kvara formira Theveninov ekvivalent, odnosno redna veza Theveninove *ems* i Theveninove impedanse. Na primeru dvomašinskog sistema ilustrovana je ideja redukcije šeme tako da se sve što je odočno po pravilu zanemaruje. Naime, pošto za vreme trajanja kratkog spoja naponi generalno padaju, odnosno snižavaju se moduli napona u sistemu, to efekat odočnih elemenata u sistemu postaje slabo uticajan pa čak i zanemarljiv. Od odočnih elemenata se pre svega misli na potrošnju. Iz tih razloga se često kod inženjerskih proračuna struja kratkih spojeva, efekti potrošnje po pravilu zanemaruju.

Implicitno se vidi sa prethodnih slika da se kod ekvivalentiranja za potrebe aproksimativnih proračuna struja kratkih spojeva po pravilu čine i sledeće pretpostavke:

- Vod se zamenjuje samo sa rednom reaktansom; odočne grane voda i redne rezistanse se, dakle, obično zanemaruju u π -šemi voda kod aproksimativnih inženjerskih proračuna.
- Transformator se ekvivalentira samo sa reaktansom rasipanja, odnosno kod aproksimativnih inženjerskih proračuna zanemaruju se elementi odočne grane i redna rezistansa.
- Generatori se ekvivalentiraju svojom subtranzijentnom ili tranzijentnom reaktansom, u zavisnosti koji je period od interesa za proračun, i odgovarajućom *ems* (postavljenom) iza te reaktanse.

Ovde je važno istaći da je ustaljeni period kvara (odnosno njegova kvazistacionarna slika) od najmanjeg interesa za proučavanje, pošto do njega u praksi veoma retko i dolazi. Naime, relejna zaštita je tako podešena da se kvarovima ne sme dopustiti da suviše dugo traju kako bi se negativne posledice po mrežu ograničile, odnosno držale pod kontrolom. Poznato je da inženjeri kratke spojeve ne mogu u sistemu da izbegnu ali mogu njihove negativne posledice držati pod kontrolom.

Posle ovakvih uprošćenja, ili u opštem slučaju bez njih, može se za ma kako složeno kolo uvek izvršiti redukcija mreže na Theveninov ekvivalent i preko Theveninovog ekvivalenta i nadodate ekvivalentne impedanse kvara može se izračunati promena struje koja teče kroz mesto kvara. Da bi se našle struje koje se imaju u ostalim granama kola trebalo bi primeniti znanja iz teorije kola. Struje se u principu raspoređuju obrnuto srazmerno impedansama, tako da se zadatak svodi na nalaženje raspodele struja za zadatu struju idealnog strujnog izvora (na mestu kvara) u svim granama proizvoljno složenog kola, odnosno u svim granama mreže i po svim sabirnicama (strujni razdelnik).

Superpozicijom struja i napona izračunatih na Theveninovom ekvivalentu (tj. promena struja i napona) sa strujama i naponima iz radnog stanja (pre kvara) dobija se ukupna slika kvara, tj. dobijaju se struje i naponi za vreme kvara.

Važno je još jednom ukazati da se radno stanje nalazi preko softverskih programa za proračune stacionarnih stanja, odnosno tokova snaga i naponskih prilika (raspodela snaga). Struja kroz granu kojom se simulira kvar (strukturna promena mreže) se takođe nalazi kao zbir dveju struja. Pošto ova grana pre kvara nije egzistirala, radna struja kroz ovu granu je bila jednaka nuli, ~~tako da je struja kvara jednaka promeni struje kroz granu kvara, odnosno struji na Theveninovom ekvivalentu.~~

U tipičnim inženjerskim proračunima u normalnom radnom stanju struje su pretežno u fazi sa naponima, zbog rezistivnog karaktera opterećenja, dok su promene struje, tj. struje na Theveninovom ekvivalentu, dominantno induktivnog karaktera (u slučaju zanemarenja aktivnih otpornosti struje su čisto induktivne). Amplitude (odnosno efektivne vrednosti) promena struja su osetno veće od amplituda (odnosno efektivnih vrednosti) radnih struja u sistemima sa uzemljenim zvezdištima, i to tipično za jedan red veličine, odnosno desetak puta. Iz ovih razloga, kako je već napomenuto, veoma često se kod uprošćenih proračuna struja kratkih spojeva, radne struje zanemaruju. U školskim primerima to se najčešće radi, a greške su u domenu 10% i manje.

Theveninova *ems* je jednaka, kao što je već konstatovano, naponu praznog hoda u Theveninovom ekvivalentu. Fizički to nije ništa drugo nego napon između tačke koja će biti pogođena kvarom, tačka F_d , i sabirnicama nultog potencijala, tačka N_d , a to je radni napon koji vlada na sabirnicama od interesa, pre kvara (radni napon na mestu kvara pre kvara). Dakle, ako se radi uprošćeno tada se samo preko informacije o ovom naponu mogu proračunati struje kratkog spoja, dok informacije o ostalim *ems* iz radnog stanja nisu potrebne. Ovo je velika elegancija ovakvih inženjerskih računa i istovremeno metodološki temelj proračuna. Pri tome se može orijentaciono pretpostaviti da je ovaj napon negde oko nominalne vrednosti. To dalje znači da se uzima da je radni napon na mestu kvara pre nastanka kvara jednak 1,0 r.j. kod proračuna sa relativnim jedinicama (jedinični sistem). Kroz povećane vrednosti ovog napona može se u proračune jednostavno uključiti i doprinos radnog stanja (efekat predopterećenja). Međutim,

važno je poznavati tačnu vrednost radnog napona na mestu kvara pre nastanka kvara (iz proračuna tokova snaga i naponskih prilika). Ako je ova vrednost baš jednaka nominalnom naponu mreže, tada njeno mehaničko uvećanje za 10% znači respektovanje doprinosa radnog stanja upravo za taj iznos.

6.3. Simetrične komponente

Proračuni kvazistacionarnih stanja (subtranzijentnog i tranzijentnog) shvaćenih kao nepromenljivih se upravo rade sa idejom da se fazorski račun zadrži validnim. Međutim, nesimetričnost većine otočnih i rednih kvarova zahteva ili komplikovanje proračune po sve tri faze ili uvođenje odgovarajućeg matematičkog aparata. U inženjerskim računima još uvek se najčešće koristi sistem simetričnih komponenti koji će upravo u ovom delu biti objašnjen. Njegova upotrebna vrednost kako za inženjerske tako i za školske potrebe je nesporna tako da je on dominantan u odnosu na neke druge sisteme (npr. $\alpha, \beta, 0$ komponente). Isto tako treba ukazati da se danas, zahvaljujući primeni digitalnih računskih mašina, svi ovi proračuni mogu raditi u koordinatama faznih veličina, odnosno sa originalnim veličinama. Međutim, uvođenje simetričnih komponenti pomaže da se i neki fizički rezoni vezani za povratnu struju kroz zemlju lakše usvoje.

Polazni zadatak je da se proizvoljan sistem od tri nesimetrična fazora (npr. tri nesimetrična fazora napona $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ u relaciji (6.1)) predstavi preko tri grupe od tri fazora simetričnih komponenti (ukupno devet fazora), pri čemu se svaka grupa reprezentuje samo preko jednog fazora (grupa direktnog redosleda preko \underline{U}_d , grupa inverznog redosleda preko \underline{U}_i , grupa nultog redosleda preko \underline{U}_o) (preostala dva unutar grupe se poznaju automatski prema principima simetričnosti trofaznih sistema).

Dakle, za tri nesimetrična fazora napona se ima:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_o \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

U relaciji (6.1) matricu kolonu fazora napona čine u opštem slučaju tri nesimetrična proizvoljna fazora, a matricu kolonu fazora napona simetričnih komponenti čine komponente koje se odnose na fazu a . Indeks a je izostavljen samo zbog jednostavnosti interpretacije. Direktno komponente faza b i c se lako izračunavaju kao:

$$\underline{U}_{d,b} = \underline{a}^2 \underline{U}_d \quad (6.2)$$

$$\underline{U}_{d,c} = \underline{a} \underline{U}_d \quad (6.3)$$

a inverzne kao:

$$\underline{U}_{i,b} = \underline{a} \underline{U}_i \quad (6.4)$$

$$\underline{U}_{i,c} = \underline{a}^2 \underline{U}_i \quad (6.5)$$

Nulte komponente imaju osobinu jednovremenosti:

$$\underline{U}_{o,a} = \underline{U}_{o,b} = \underline{U}_{o,c} \quad (6.6)$$

odnosno nulti naponi su u sve tri faze jednovremeni naizmenični naponi. Relacija (6.1) obično se zapisuje u matrično vektorskoj notaciji:

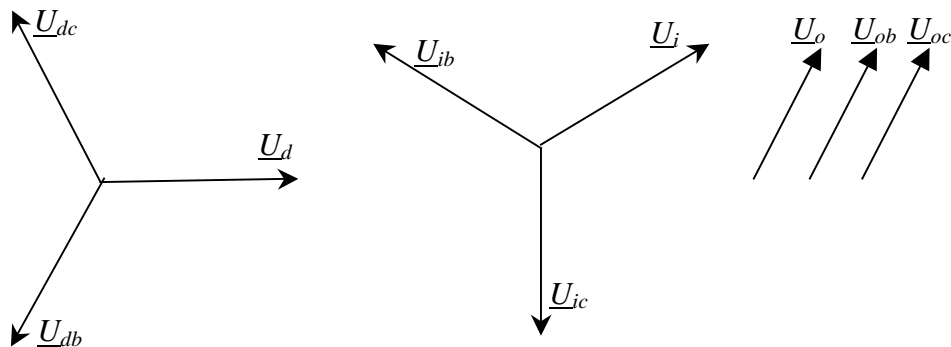
$$\underline{U}_{a,b,c} = \mathbf{F} \underline{U}_{d,i,o} \quad (6.7)$$

U relaciji (6.6) sa \mathbf{F} je obeležena Fortescue-ova matrica, čija je determinanta jednaka $3(\underline{a} - \underline{a}^2)$, tako da egzistira inverzna matrica.

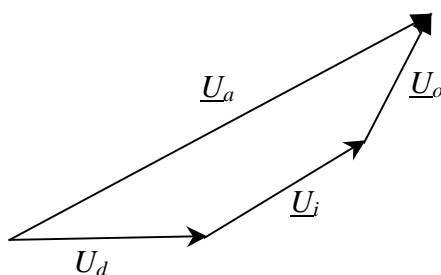
Kompleksni operator \underline{a} je već definisan u prethodnim poglavljima, $\underline{a} = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$, i množenje nekog fazora sa kompleksnim operatorom \underline{a} svodi se na rotaciju tog fazora u pozitivnom matematičkom smislu (suprotno kretanju kazaljke na časovniku) za 120° . Korisne osobine koje se koriste pri radu sa ovim operatorom su:

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \quad \underline{a}^2 = \underline{a}^* \quad \underline{a}^3 = 1 \quad \underline{a}^* = e^{-j2/3}$$

Grafička interpretacija skupa od devet fazora data je na sl. 6.4. a vektorsko sabiranje za proizvoljan vektor \underline{U}_a na sl. 6.5.



Sl. 6.4. Grafički prikaz skupa od 9 fazora simetričnih komponenti



Sl. 6.5. Vektorsko sabiranje simetričnih komponenti

Važno je ukazati da su intenziteti fazora unutar grupa (direktne, inverzne i nulte) simetričnih komponenti jednaki i da im se razlikuju samo fazni stavovi. Iz prethodnih osobina jasno je da se od ovih devet fazora samo tri (po jedan iz svake grupe) mogu odrediti nezavisno. I naravno, prema (6.7), sledi da se za zadate fazne veličine simetrične komponente faze a nalaze kao:

$$\underline{U}_{d,i,o} = \frac{1}{3} \mathbf{F}^{-1} \underline{U}_{a,b,c} \quad (6.8)$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_o \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Treba ukazati da kada se poznaju simetrične komponente za fazu a prema relaciji (6.9), tada se simetrične komponente faza b i c lako izračunavaju.

6.4. Sprege komponentnih sistema na mestu kvara sa osnovnim analitičkim jednačinama za razne vrste kvara

U tabeli 6.1 specificirane su osnovne matematičke relacije za 4 vrste otočnih kvarova. Jednačine napisane za zonu nesimetrije su osnovne jednačine fizičke očiglednosti koje se vide direktnom inspekcijom mesta kvara uz uvažavanje vrste kvara. Pošto je po pretpostavci mesto kvara izvor nesimetrije (osim za slučaj trofaznog kratkog spoja) to se zadatak ne može rešiti primenom jednofaznih šema jer mreža nema zahtevanu trofaznu simetriju. Međutim, činjenica da je samo mesto kvara nesimetrično, a da je preostali deo mreže simetričan, pruža mogućnost da se uvođenjem simetričnih komponenti, nesimetrija mesta kvara interpretira preko simetričnih komponenti (poslednja vrsta u tabeli 6.1), odnosno da se nesimetrija takođe uvede u zonu simetrije i da se dalje proračun radi samo sa simetričnim komponentama. Relacije u poslednjoj vrsti table 6.1 su direktna posledica primene relacije (6.7), odnosno transformisanja tih jednačina u koordinate simetričnih komponenti.

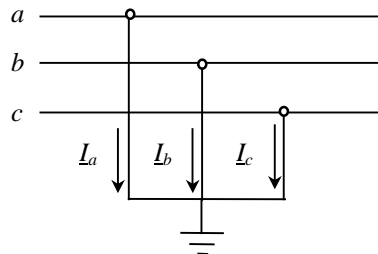
Tabela 6.1 Osnovne analitičke relacije otočnih kvarova

Vrsta kvara	k3	k1Z	k2	k2Z
Zona nesimetrije	$\underline{U}_a = \underline{U}_b = \underline{U}_c = 0$	$\underline{U}_a = 0$ $\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0$	$\underline{I}_a = 0$ $\underline{U}_b = \underline{U}_c; \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$	$\underline{I}_a = 0$ $\underline{U}_b = \underline{U}_c = 0$
Zona simetrije	$\underline{U}_i = \underline{U}_j = \underline{U}_o = 0$ $\underline{I}_i = \underline{I}_o = 0$	$\underline{U}_i + \underline{U}_j + \underline{U}_o = 0$ $\underline{I}_i = \underline{I}_j = \underline{I}_o$	$\underline{I}_o = 0; \underline{U}_o = 0$ $\underline{I}_i + \underline{I}_j = 0; \underline{U}_i = \underline{U}_j$	$\underline{I}_i + \underline{I}_j + \underline{I}_o = 0$ $\underline{U}_i = \underline{U}_j = \underline{U}_o$

Trofazni kratki spoj

Kod trofaznog kratkog spoja ilustrovanog na sl. 6.6 se smatra da su sve tri faze pogođene kvarom, tj. desio se trofazni kratki spoj sa zemljom. U principu je svedjedno da li je ovaj kvar sa ili bez zemlje, pošto je trofazni kratki spoj simetričan. Osnovne jednačine fizičke očitlednosti se uočavaju inspekcijom mesta kvara i svode se na činjenicu da su naponi sve tri faze jednake nuli. Inverzni i nulti sistem struja ne egzistiraju, zbog simetrije kvara, a mesto kvara (odnosno otočne grane kojima se simulira k3) je ekvivalentirano sa idealnim strujnim izvorima. Dakle, za slučaj trofaznog kratkog spoja (k3) se ima:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_b = \underline{U}_c = 0 \quad (6.10)$$



Sl. 6.6 Interpretacija trofaznog kratkog spoja

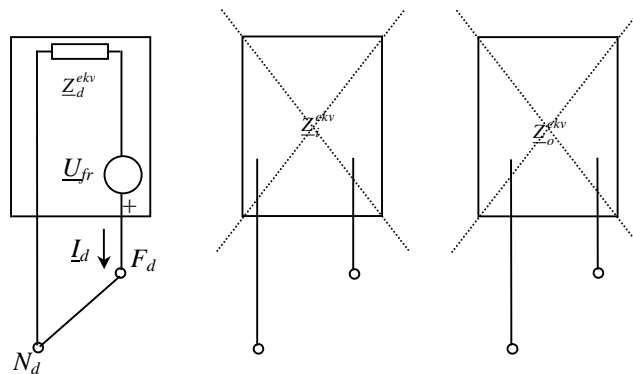
Simetrične komponente napona na mestu kvara, na osnovu prethodne veze kao i na osnovu primene relacije (6.7) su:

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i = \underline{U}_o = 0 \quad (6.11)$$

Kako su evidentno inverzni i nulti sistem u slučaju trofaznog kratkog spoja prazni (nema ih), to se u stvari na mestu kvara ima samo direktni komponentni sistem kao posledica simetričnog kvara, kao što je prikazano na sl. 6.6. Dakle, ima se

$$\underline{I}_i = \underline{I}_o = 0 \quad (6.12)$$

Strukturalna nesimetrija se simulira sa dva kraja (dva izvoda F_d i N_d) koji su izvučeni na mestu gde će se, po pretpostavci, desiti kratak spoj. Smer struje \underline{I}_d je iz sistema u mesto kvara, a što odgovara i fizičkoj logici stvari.



Sl. 6.7 Sprege komponentnih sistema za slučaj trofaznog kratkog spoja

Ova dva pomenuta kraja obeležena sa F_d i N_d označavaju fazu i nulu direktnog komponentnog sistema, (zato indeks d), \underline{Z}_d^{ekv} označava ekvivalentnu Theveninovu impedansu direktnog redosleda, odnosno ulaznu impedansu gledanu odočno sa mesta kvara za direktan redosled (direktan komponentni sistem), dok je sa \underline{I}_d obeležena struja direktnog redosleda koja teče u mesto kvara. Treba odmah ukazati da je pretpostavljeno da je impedansa kvara (prelazna impedansa na mestu kvara) jednaka nuli, tako da se struja direktnog redosleda prema jednostavnom kolu prikazanom na prethodnoj slici računa kao:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv}} \quad (6.13)$$

U poslednjoj jednačini pretpostavljeno je nadalje, kako je to već i diskutovano, da je Theveninova ems upravo jednaka faznom radnom naponu na mestu kvara, odnosno $\underline{E}_T = \underline{U}_{fr}$. Naravno, pošto je impedansa po fazi, to se onda i struje računaju po fazi (odnosno ne računaju se kao računске (linijske) vrednosti).

Stvarne veličine struja kroz mesto kvara mogu se sada lako izračunati primenom relacije (6.7) kao:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_o \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

Odakle direktno sledi:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv}}; \underline{I}_b = \underline{a}^2 \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv}}; \underline{I}_c = \underline{a} \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv}} \quad (6.15)$$

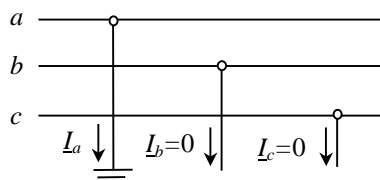
Treba ukazati da je uobičajeno referentni fazor u proračunima struja kratkog spoja upravo fazni radni napon koji vlada na mestu kvara pre nastanka kvara.

Naravno, primenom analognog postupka na izračunavanje stvarnih vrednosti napona na mestu kvara, samo se konstatuju jednačine fizičke očiglednosti, odnosno ima se:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_b = \underline{U}_c = 0 \quad (6.16)$$

Jednofazni kratki spoj sa zemljom

Po konvenciji se pri jednofaznom kratkom spoju sa zemljom pretpostavlja da je faza *a* pogođena kvarom, tako da se jednačina fizičke očiglednosti za tu fazu svodi na konstataciju da je njen napon na mestu kvara jednak nuli. Zdrave faze su faze *b* i *c*, tako da su za njih jednačine fizičke očiglednosti na mestu kvara konstatacija činjenice da struje kroz njihove otočne izvode iznose nula, pošto ove faze nemaju kontakt sa zemljom.



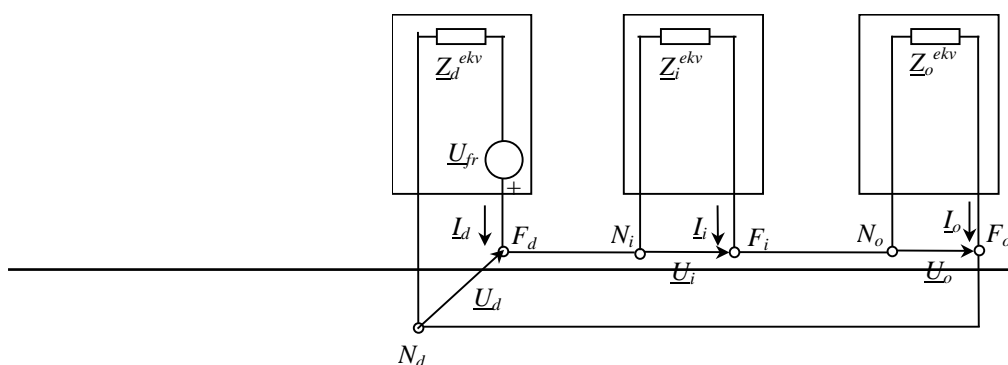
Sl. 6.8 Interpretacija jednofaznog kratkog spoja

Prema tome, jednačine fizičke očiglednosti koje se pišu na osnovu inspekcije mesta kvara, su:

$$\underline{U}_a = 0 \quad (6.17)$$

$$\underline{I}_b = 0 \quad (6.18)$$

$$\underline{I}_c = 0 \quad (6.19)$$



Sl. 6.9. Sprege komponentnih sistema za slučaj jednofaznog kratkog spoja sa zemljom

Posledica jednačine (6.17) je sledeća jednačina u koordinatama simetričnih komponenti:

$$\underline{U}_d + \underline{U}_i + \underline{U}_o = 0 \quad (6.20)$$

Analogno se u koordinatama simetričnih komponenti za jednačine (6.18) i (6.19) ima:

$$\underline{a}^2 \underline{I}_d + \underline{a} \underline{I}_i + \underline{I}_o = 0 \quad (6.21)$$

$$\underline{a}I_d + \underline{a}^2 I_i + I_0 = 0 \quad (6.22)$$

Izjednačavanjem prethodne dve relacije direktno se nalazi:

$$(\underline{a}^2 - \underline{a})I_d = (\underline{a}^2 - \underline{a})I_i, \text{ odnosno dobija se da je:}$$

$$I_d = I_i \quad (6.23)$$

Zamenom (6.23) u relaciju (6.21), uz korišćenje osobine da je $\underline{a}^2 + \underline{a} = -1$, nalazi se:

$$I_d = I_0 \quad (6.24)$$

Relacije (6.23) i (6.24) ukazuju da pošto su direktna, inverzna i nulta struja za slučaj jednofaznog kratkog spoja međusobno jednake, da su komponentni sistemi na mestu kvara vezani redno, baš kako je i prikazano na sl. 6.9. Prema ovoj slici lako se proverava i korektnost relacije (6.24).

Kod direktnog komponentnog sistema jedino se ima tzv. *aktivni sistem*, a razlog leži u tome što generatori u normalnim radnim stanjima, koja prethode kratkom spoju, proizvode simetrični, direktni, trofazni sistem napona, odnosno Theveninova ems figuriše samo u direktnom sistemu. Ostala dva komponentna sistema su *pasivni sistemi*. Interesantno je ukazati da zbog redne veze komponentnih sistema u slučaju jednofaznog kratkog spoja sa zemljom tačke N_d , N_i i N_0 (koje predstavljaju nule direktnog, inverznog i nultog komponentnog sistema) nisu tačke na istom potencijalu u ovom slučaju.

Stvarno stanje, tj. realni EES za vreme trajanja kvara, predstavlja zbog nesimetrije na mestu kvara nesimetrično stanje (pod pretpostavkom da je u pitanju nesimetričan kvar). Precizno govoreći direktna, inverzna i nulta struja, kao idealni strujni generatori kojima se zamenjuje mesto kvara, proizvode različite promene struja u direktnom, inverznom i nultom kolu (koja su u opštem slučaju različita). Takav sistem se modeluje sa tri komponentna simetrična sistema: direktnim, inverznim i nultim komponentnim sistemom. Pretpostavlja se da su ekvivalentna direktna \underline{Z}_d^{ekv} , inverzna \underline{Z}_i^{ekv} i nulta \underline{Z}_o^{ekv} (impedansa gledane odočno sa mesta kratkog spoja) poznate. Direktni i inverzni sistem su identični za sve statičke elemente EES-a, npr. kod voda $X_d = X_i$. Direktni i inverzni sistem se razlikuje kod rotirajućih elemenata EES-a kao što su sinhroni generatori i asinhroni motori. Nulti komponentni sistem je najkomplicovaniji i njega nema bez kontakta sa zemljom.

Za direktan komponentni sistem piše se osnovna jednačina naponske ravnoteže:

$$\underline{U}_{fr} - \underline{U}_d - \underline{Z}_d^{ekv} I_d \quad (6.25)$$

Za inverzan i nulti sistem pišu se analogne jednačine koje slede na osnovu šeme na sl. 6.9.

$$\underline{U}_i + \underline{Z}_i^{ekv} I_i = 0 \quad (6.26)$$

$$\underline{U}_o + \underline{Z}_o^{ekv} I_o = 0 \quad (6.27)$$

Jednačine (6.20), (6.23 – 6.27) čine sistem od 6 jednačina sa 6 nepoznatih napona i struja u koordinatama simetričnih komponenti. Eksplicitnim izražavanjem struja iz poslednje tri relacije, uz uvažavanje činjenice da su struje međusobno jednake, i zamenom u (6.20) ima se:

$$\underline{U}_{fr} - \underline{Z}_d^{ekv} I_d - \underline{Z}_i^{ekv} I_d - \underline{Z}_o^{ekv} I_d = 0$$

odnosno:

$$I_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \quad (6.28)$$

Dalje se dobija, s obzirom na (6.23) i (6.24):

$$I_i = I_0 = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \quad (6.29)$$

Za simetrične komponente napona sada se jednostavno ima:

$$\underline{U}_d = \frac{(\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}) \underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \quad (6.30)$$

$$\underline{U}_i = -\frac{\underline{Z}_i^{ekv} \underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \quad (6.31)$$

$$\underline{U}_o = -\frac{\underline{Z}_o^{ekv} \underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \quad (6.32)$$

Veličine u faznim koordinatama, odnosno stvarne veličine struja se sada nalaze kao:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

odnosno ima se:

$$\underline{I}_a = \frac{3}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \underline{U}_{fr} \quad (6.33)$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_c = 0 \quad (6.34)$$

Relacija (6.33) daje jedan od ključnih rezultata u proračunu jednofaznog kratkog spoja. Naime, iz te relacije se vidi da je struja jednofaznog kratkog spoja sa zemljom jednaka trostrukoj nultoj vrednosti struje (ili trostrukoj direktnoj ili inverznoj vrednosti struje). Ova činjenica je veoma upotrebljiva u raznim primenama. Relacije (6.34) su vrlo korisne za proveru korektnosti analitičkih izračunavanja u proračunima složenije prirode kao kontrolne jednačine.

Stvarne veličine napona se sada izračunavaju kao:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ -\frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ -\frac{\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \underline{U}_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(\underline{a}^2 - \underline{a})\underline{Z}_i^{ekv} + (\underline{a}^2 - 1)\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ \frac{(\underline{a} - \underline{a}^2)\underline{Z}_i^{ekv} + (\underline{a} - 1)\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \underline{U}_{fr} \end{bmatrix}$$

Na osnovu prethodnog se čita:

$$\underline{U}_a = 0 \quad (6.35)$$

$$\underline{U}_b = \frac{(\underline{a}^2 - \underline{a})\underline{Z}_i^{ekv} + (\underline{a}^2 - 1)\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \underline{U}_{fr} \quad (6.36)$$

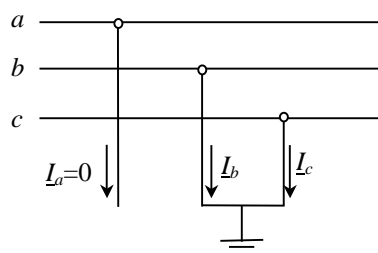
$$\underline{U}_c = \frac{(\underline{a} - \underline{a}^2)\underline{Z}_i^{ekv} + (\underline{a} - 1)\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv}} \underline{U}_{fr} \quad (6.37)$$

Relacije (6.36) i (6.37) služe za ocenu veličine stacionarnih prenapona, odnosno za procenu koliko su zdrave (ispravne) faze za vreme trajanja jednofaznog kratkog spoja izložene delovanju prenapona. Pošto je ovde reč o proračunima kvazistacionarnih stanja u pitanju su stacionarni prenaponi. Prelazni prenaponi se ne mogu proračunavati ovakvim analitičkim alatom.

Metodološki je ovde važno istaći da su ovakvim konceptom i radno stanje (preko \underline{U}_{fr}) i stanja na pasivnim podsistemima (preko ekvivalentnih impedansi i spoljnih struja), istovremeno uvaženi. Zbog toga su izračunate struje i naponi baš one veličine koje se imaju za vreme trajanja kvara. Iste okolnosti važile su za proračun trofaznog kratkog spoja, a važe i dalje u primerima proračuna dvofaznog kratkog spoja sa i bez zemlje. Za složenija kola biće korištena drugačija metodologija, koja će naknadno biti obrađena.

Dvofazni kratki spoj sa zemljom

Ovakva vrsta otočnog kvara je takođe po prirodi stvari nesimetrična. Inverzni i nulti sistem se generišu na mestu nesimetrije. Jednačine fizičke očitglednosti na mestu kvara svode se na jednakosti napona faza B i C (faza pogođenih kvarom) sa nulom i na jednakost struje zdrave faze (faze A) sa nulom, pošto otočni kraj visi i nema kontakt sa zemljom za ovu fazu na mestu strukturne nesimetrije, kojom se simulira dvofazni kratak spoj sa zemljom.



Sl. 6.10. Interpretacija dvofaznog kratkog spoja sa zemljom

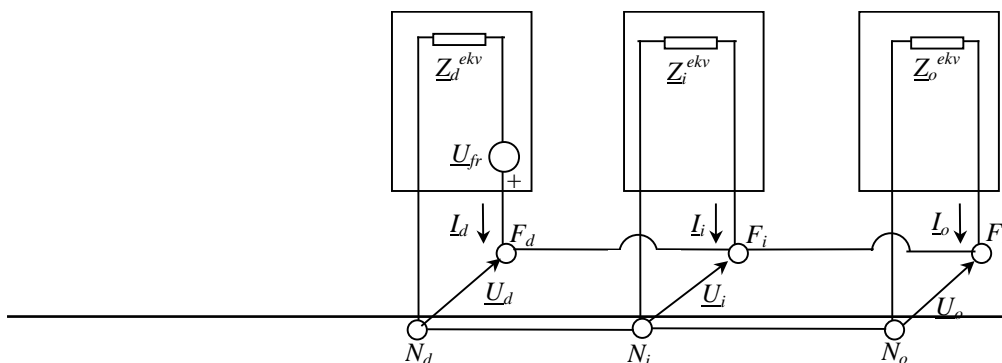
Ekvivalentne impedanse simetričnih komponenti se računaju gledano otočno sa mesta kvara kad se sve ems u šemi kratko spoje. Inverzni i nulti komponentni sistem se energetizuju preko mesta kvara.

Jednačine kvara (odnosno jednačine fizičke očitglednosti), prema sl. 6.10, su:

$$\underline{I}_a = 0 \quad (6.38)$$

$$\underline{U}_b = 0 \quad (6.39)$$

$$\underline{U}_c = 0 \quad (6.40)$$



Sl. 6.11. Sprege komponentnih sistema za slučaj dvofaznog kratkog spoja sa zemljom

Prevođenjem jednačine (6.38) u koordinate simetričnih komponenti dobija se:

$$\underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_o = 0 \quad (6.41)$$

Iz jednačina (6.39) i (6.40) posle prevođenja u sistem simetričnih komponenti se dobija:

$$\underline{a}^2 \underline{U}_d + \underline{a} \underline{U}_i + \underline{U}_o = \underline{a} \underline{U}_d + \underline{a}^2 \underline{U}_i + \underline{U}_o \quad (6.42)$$

Posle potiranja nulte komponente napona u prethodnoj relaciji direktno se vidi da su direktna i inverzna komponenta napona međusobno jednake, a posle njihove zamene u (6.40) sledi:

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i = \underline{U}_o \quad (6.43)$$

Na osnovu jednačina (6.41) i (6.43) zaključuje se da su direktni, inverzni i nulti komponentni sistem vezani međusobno paralelno na mestu kvara, pošto su naponi na karakterističnim izvodima međusobno jednaki. Dakle, ima se situacija kao na sl. 6.11. Ovde su tačke nultog potencijala pojedinih komponentnih sistema vezane u jednu tačku i nalaze se na istom potencijalu.

Jednačina (6.41) i dve jednačine iz relacije (6.43) zajedno sa jednačinama naponske ravnoteže po svakom od komponentnih sistema, napisanim za slučaj jednofaznog kratkog spoja, jednačine (6.25), (6.26) i (6.27), čine sada sistem od 6 jednačina sa 6 nepoznatih komponentnih struja i napona koji se lako rešava. Ako se sada struje direktnog, inverznog i nultog redosleda izračunaju eksplicitno iz jednačina (6.25), (6.26) i (6.27) i smene u (6.41) tada se dobija jednačina po samo jednoj nepoznatoj, direktnoj komponenti napona, pošto su inverzna i nulta komponenta napona jednake direktnoj prema (6.43):

$$\frac{\underline{U}_{fr} - \underline{U}_d}{\underline{Z}_d^{ekv}} - \frac{\underline{U}_d}{\underline{Z}_i^{ekv}} - \frac{\underline{U}_d}{\underline{Z}_o^{ekv}} = 0$$

odnosno:

$$\underline{U}_d = \underline{U}_{fr} \frac{\underline{Z}_o^{ekv} \underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}^2} \quad (6.44)$$

U (6.44) radi kraćeg pisanja uvedena je oznaka:

$$\underline{Z}^2 = \underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_o^{ekv} + \underline{Z}_d^{ekv} \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv} \underline{Z}_i^{ekv} \quad (6.45)$$

Na osnovu (6.43) direktno se ima:

$$\underline{U}_i = \underline{U}_o = \underline{U}_{fr} \frac{\underline{Z}_o^{ekv} \underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}^2} \quad (6.46)$$

Rešavanjem jednačine (6.25) po direktnoj komponenti struje za poznatu direktnu komponentu napona dobija se:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr} (\underline{Z}_o^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv})}{\underline{Z}^2} \quad (6.47)$$

Analogno se rešavanjem jednačina (6.26.) i (6.27.) po nepoznatoj inverznoj i nultoj komponenti struje dobija:

$$\underline{I}_i = -\frac{\underline{U}_{fr} \underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \quad (6.48)$$

$$\underline{I}_o = -\frac{\underline{U}_{fr} \underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}^2} \quad (6.49)$$

Stvarne veličine struja kroz mesto kvara, struja u faznim koordinatama sada se nalaze kao:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(\underline{a}^2 - 1)\underline{Z}_i^{ekv} + (\underline{a}^2 - \underline{a})\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \\ \frac{(\underline{a} - 1)\underline{Z}_i^{ekv} + (\underline{a} - \underline{a}^2)\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \end{bmatrix} \quad (6.50)$$

Prema tome dobija se:

$$\underline{I}_a = 0 \quad (6.51)$$

$$\underline{I}_b = \frac{(\underline{a}^2 - 1)\underline{Z}_i^{ekv} + (\underline{a}^2 - \underline{a})\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \quad (6.52)$$

$$\underline{I}_c = \frac{(\underline{a} - 1)\underline{Z}_i^{ekv} + (\underline{a} - \underline{a}^2)\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \quad (6.53)$$

Analogno se za napone u faznim koordinatama dobija:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \\ \frac{\underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \\ \frac{\underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3\underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.54)$$

Prema tome konačni izrazi za napone su:

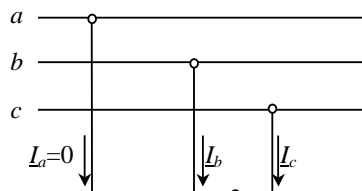
$$\underline{U}_a = \frac{3\underline{Z}_i^{ekv} \underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \quad (6.55)$$

$$\underline{U}_b = 0 \quad (6.56)$$

$$\underline{U}_c = 0 \quad (6.57)$$

Dvofazni kratki spoj bez zemlje

Pošto kod ove vrste otočnog kvara nema kontakta sa zemljom to onda nema ni nultog sistema, tako da je to glavna razlika u odnosu na slučaj dvopolnog kratkog spoja sa zemljom, sl. 6.12.



Sl. 6.12. Interpretacija dvopolnog kratkog spoja bez zemlje

Dvofazni kratki spoj bez zemlje se prema tome može tretirati na isti način kao i dvofazni kratak spoj sa zemljom, s tim da se stavi samo da su nulte komponente jednake nuli. Dakle, ima se:

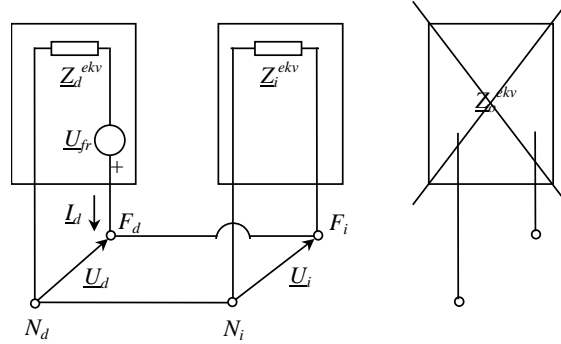
$$\underline{I}_d + \underline{I}_i = 0 \quad (6.58)$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i \quad (6.59)$$

$$\underline{I}_o = 0 \quad (6.60)$$

$$\underline{U}_o = 0 \quad (6.61)$$

Naravno, na osnovu ovoga se zaključuje da su direktni i inverzni komponentni sistem na mestu kvara spregnuti međusobno u paralelu, kao što je to ilustrovano na sl. 6.13.



Sl. 6.13. Sprege komponentnih sistema za slučaj dvofaznog kratkog spoja bez zemlje

Jednačine fizičke očitglednosti se direktno čitaju inspekcijom mesta kvara, sl. 6.13:

$$\underline{I}_a = 0 \quad (6.62)$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_c \quad (6.63)$$

$$\underline{I}_b + \underline{I}_c = 0 \quad (6.64)$$

U koordinatama simetričnih komponenti ove jednačine dobijaju sledeću formu:

$$\underline{I}_d + \underline{I}_i = 0 \quad (6.65)$$

Jednačina naponske ravnoteže za ovaj slučaj je:

$$\underline{U}_{fr} = \underline{I}_d (\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}) \quad (6.66)$$

Sada se lako izračunavaju simetrične komponente struja i napona na mestu kvara:

$$\underline{I}_o = 0 \quad (6.67)$$

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \quad (6.68)$$

$$\underline{I}_i = -\frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \quad (6.69)$$

$$\underline{U}_o = 0 \quad (6.70)$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_i = \frac{\underline{Z}_i^{ekv} \underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \quad (6.71)$$

Stvarne veličine struja (u faznim koordinatama) kroz mesto kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \\ \underline{I}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(\underline{a}^2 - \underline{a})}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ -\frac{(\underline{a}^2 - \underline{a})}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \end{bmatrix} \quad (6.72)$$

Odnosno ima se:

$$\underline{I}_a = 0 \quad (6.73)$$

$$\underline{I}_b = \frac{(a^2 - a)}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \quad (6.74)$$

$$\underline{I}_c = -\frac{(a^2 - a)}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \quad (6.75)$$

Stvarne veličine napona (u faznim koordinatama) na mestu kvara su:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \\ \underline{U}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ \frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ \frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ -\frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \\ -\frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \end{bmatrix} \quad (6.76)$$

Odnosno ima se:

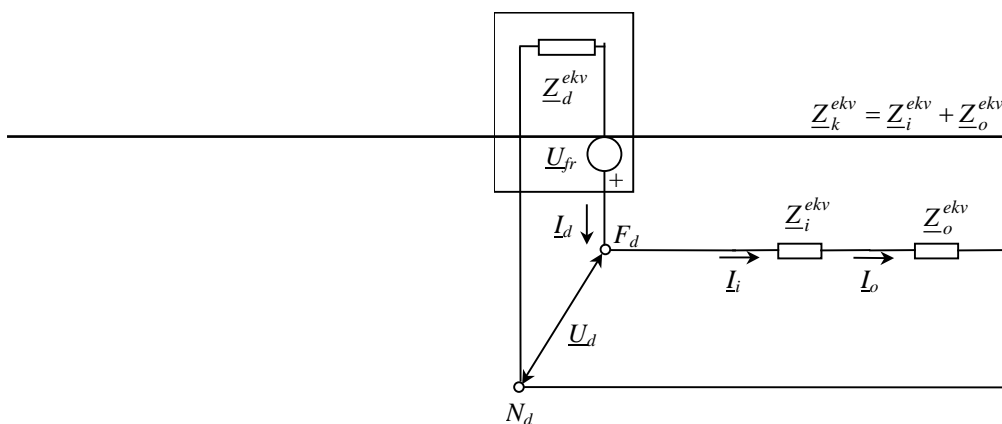
$$\underline{U}_a = \frac{2\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \quad (6.77)$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_c = -\frac{\underline{Z}_i^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv}} \underline{U}_{fr} \quad (6.78)$$

Na taj način su osnovni proračuni za četiri vrste otočnih kvarova pokriveni sa vrlo jednostavnim relacijama koje omogućavaju da se jednostavni (školski) primeri uspešno rešavaju. Za složenije mreže ovakav alat nije dovoljan.

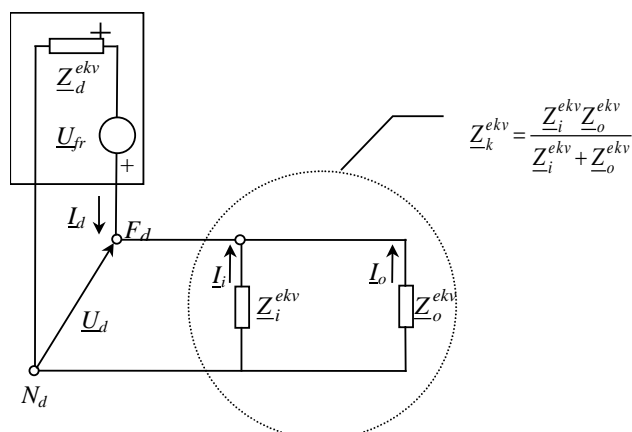
6.5. Pojednostavljenje blokova

Ideja pojednostavljenja sprega komponentnih sistema na mestu kvara svodi se na uvođenje impedanse kvara \underline{Z}_k kojom se blokovi inverznog i nultog komponentnog sistema predstavljaju u proračunima kvazistacionarnih stanja (ako bi se na ovu impedansu kvara redno vezala i impedansa luka tada bi se dobila proširena impedansa kvara, \underline{Z}_f , koja je već uvedena u ovom poglavlju). Dakle, radi se samo o formalnom uprošćenju zamenskih šema sa kojima se zatim elegantnije može sprovesti proračun. Za trofazni kratki spoj se, pošto kod njega nema inverznog i nultog komponentnog sistema, crta samo jedan blok i to direktnog redosleda, kod koga je ekvivalentna impedansa kvara, \underline{Z}_k , jednaka nuli.



Sl. 6.14. Ekvivalentna impedansa kvara za slučaj jednofaznog kratkog spoja sa zemljom

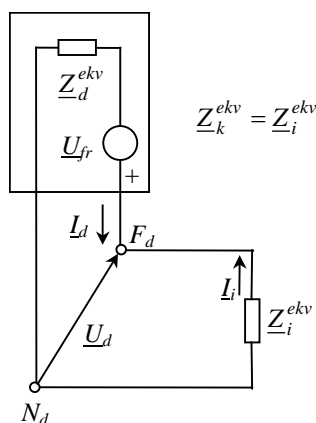
U slučaju jednofaznog kratkog spoja inverzni i nulti komponentni sistemi su vezani na red, tako da je ekvivalentna impedansa kvara redna veza odgovarajućih impedansi inverznog i nultog komponentnog sistema, sl. 6.14.



Sl. 6.15. Ekvivalentna impedansa kvara za slučaj dvofaznog kratkog spoja sa zemljom

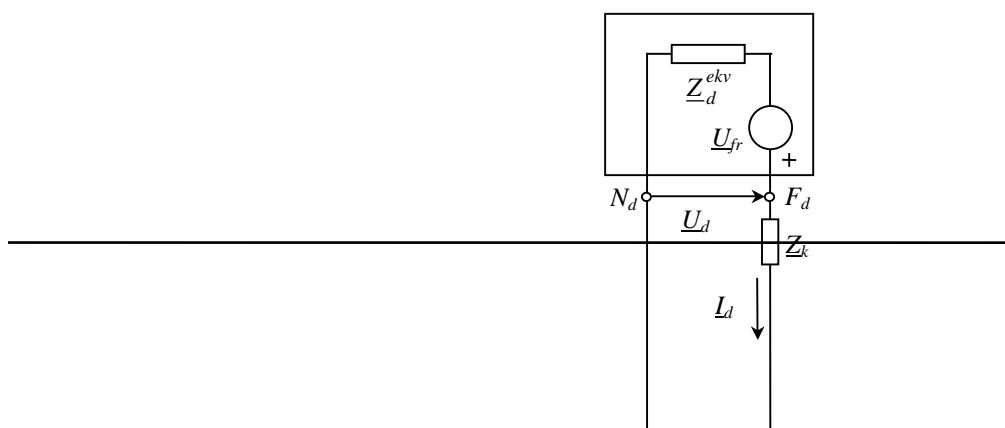
Za slučaj dvofaznog kratkog spoja sa zemljom (k2Z) ekvivalentna impedansa kvara se simulira sa paralelnom vezom impedansi inverznog i nultog redosleda, kako je ilustrirano na sl. 6.15.

Naravno, ekvivalentna impedansa kvara za slučaj dvofaznog kratkog spoja bez zemlje se jednostavno nalazi iz prethodnog slučaja kad se stavi da nultog sistema nema, a što je prikazano na sl. 6.16.



Sl. 6.16. Ekvivalentna impedansa kvara za slučaj dvofaznog kratkog spoja bez zemlje

Na ovaj način proračun struja kratkih spojeva može se svesti na proračune sa proširenim direktnim komponentnim sistemom, koji je vezan sa nekom impedansom \underline{Z}_k koja se razlikuje za razne kvarove, kako je to prikazano na sl. 6.17.



Sl. 6.17. Ekvivalentna šema sa proširenim direktnim sistemom

Ovo se može interpretirati, kako je već nagovešteno, kao generalan slučaj sa proširenim trofaznim kratkim spojem preko impedanse kvara \underline{Z}_k . Ukoliko bi se imali kvarovi preko luka tada bi impedansa kvara bila uvećana samo za odgovarajuću vrednost impedanse luka.

Na sl. 6.17 je $\underline{U}_{fr} = \underline{E}_T$, dok je sa \underline{Z}_d^{ekv} obeležena, kao i u prethodnim razmatranjima, ekvivalentna (ulazna) impedansa gledana očno sa mesta kvara direktnog redosleda. Na osnovu ekvivalenta sa sl. 6.17 osnovne jednačine koje se mogu postaviti su:

$$\underline{U}_d = \underline{I}_d \underline{Z}_k \quad (6.79)$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_{fr} - \underline{I}_d \underline{Z}_d^{ekv} \quad (6.80)$$

$$\underline{U}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_k} \underline{Z}_k \quad (6.81)$$

Za slučaj da je $\underline{Z}_k = 0$ (slučaj k3), dobija se, kao što je i prethodno pokazano:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv}} \quad (6.82)$$

6.6. Proračuni struja kratkog spoja sa uvažavanjem električnog luka

Kvarovi preko luka, odnosno kratki spojevi koji su praćeni sa lukom su česta pojava u mrežama. Luk se modeluje odgovarajućom impedansom, pri čemu treba ukazati da se ona uglavnom svodi na rezistansu. Činjenica da luk postoji, odnosno da je na mestu kratkog spoja rezistansa luka s jedne strane olakšava situaciju u pogledu struje kvara, ali može da je i oteža ako se imaju u vidu potencijalni prenaponi. Pri izboru zaštitnih uređaja, odnosno prilikom detekcije tipa kvara luk se mora uzimati u obzir.

Treba istaći da je aktivna otpornost luka, R_L , srazmerna sa dužinom luka L_L , dakle što je luk duži, to se ima veća aktivna otpornost. S druge strane otpornost luka zavisi obrnuto proporcionalno od struje luka tako da se aktivna otpornost luka može izračunavati prema sledećem empirijskom obrascu:

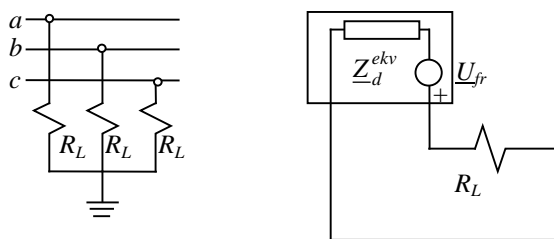
$$R_L = \frac{28700 L_L}{I^{1,4}} \quad (6.83)$$

Za numeričke vrednosti u (6.83) R_L će se dobiti u Ω ako se L_L smeni u m a I u A.

Za slučaj trofaznog kratkog spoja preko luka, koji je simetričan u sve tri faze, odgovarajuća ekvivalentna šema je prikazana na sl. 6.18.

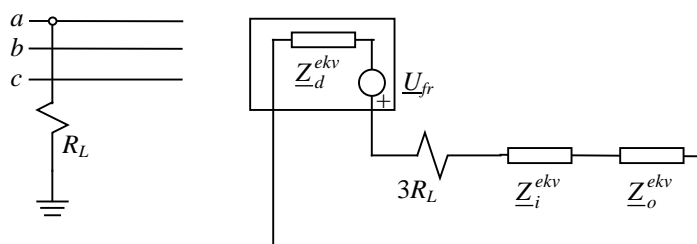
Izračunavanje struje trofaznog kratkog spoja je analogno situaciji sa čistim metalnim kratkim spojem, s tim da se ukupna impedansa kola (monofaznog tipa) proširuje sa otpornošću luka. Dakle, ima se:

$$\underline{I}_k = \underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + R_L} \quad (6.84)$$



Sl. 6.18 Modelovanje luka kod trofaznog kratkog spoja

Za slučaj jednofaznog kratkog spoja preko luka odgovarajuća ekvivalentna šema je prikazana na sl. 6.19:



Sl. 6.19 Modelovanje luka kod jednofaznog kratkog spoja

Struja direktnog redosleda se računa po punoj analogiji sa prethodnim postupcima s tim da se mora respektovati rezistansa luka (koja se u monofaznoj šemi pojavljuje sa trostrukom vrednošću pošto kroz nju teče trostruka nulta struja):

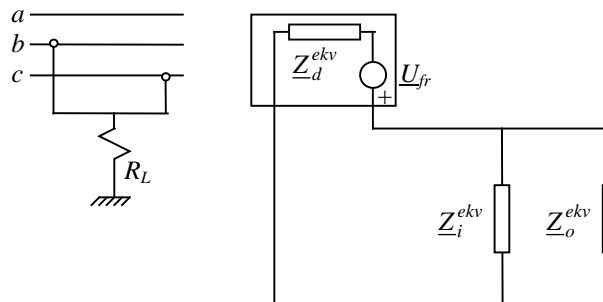
$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv} + 3R_L} \quad (6.85)$$

Za slučaj dvofaznog kratkog spoja sa zemljom preko luka odgovarajuća ekvivalentna šema je prikazana na sl. 6.20.

Pošto se otpornost luka R_L nalazi prema zemlji, to se zaključuje da ne utiče na direktni i inverzni komponentni sistem, već samo na nulti. Struja direktnog redosleda se računa po punoj analogiji sa prethodnim postupcima, s tim da se mora respektovati rezistansa luka:

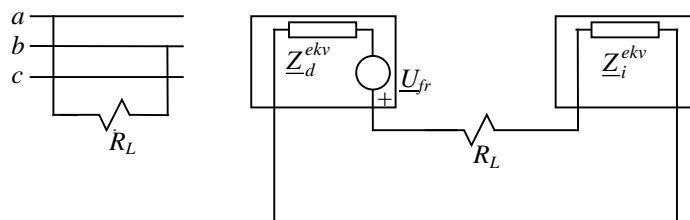
$$\underline{I}_d = \frac{\underline{Z}_i^{ekv} + \underline{Z}_o^{ekv} + 3R_L}{\underline{Z}^2} \underline{U}_{fr} \quad (6.86)$$

U (6.86) veličina \underline{Z}^2 se računa prema formuli (6.45) a razlog za trostruku vrednost rezistanse luka je isti kao i u slučaju jednofaznog kratkog spoja preko luka.



Sl. 6.20 Modelovanje luka kod dvofaznog kratkog spoja sa zemljom

Za slučaj dvofaznog kratkog spoja bez zemlje preko luka odgovarajuća ekvivalentna šema je prikazana na sl. 6.21.



Sl. 6.21 Modelovanje luka kod dvofaznog kratkog spoja bez zemlje

Pošto ovde nema nultog komponentnog sistema, to se uzima da otpor luka podjednako utiče i na direktni i na inverzni komponentni sistem. Struja direktnog redosleda se računa po punoj analogiji sa prethodnim postupcima, s tim da se mora respektovati rezistansa luka:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{fr}}{\underline{Z}_d^{ekv} + \underline{Z}_i^{ekv} + R_L} \quad (6.87)$$