

7. Matrični proračuni kratkih spojeva

7.1. Matrica impedansi čvorova

U analizi EES-a, pored ostalih matrica, dve matrice parametara sistema su od posebnog značaja. To su matrica impedansi čvorova i matrica admitansi čvorova. Umesto termina *čvor* u analizi elektroenergetskih sistema se često kao ravnopravan termin koristi termin *sabirnica*. Pošto se engleski termin za sabirnice, *bus*, takođe veoma često koristi, to se u notaciji, kao indeks koji određuje o kojoj matrici je reč, koriste oznake kao u narednim jednakostima:

$$\underline{Y}_{\check{c}v} \equiv \underline{Y}_{BUS}$$

$$\underline{Z}_{\check{c}v} \equiv \underline{Z}_{BUS}$$

Matrica admitansi čvorova je kvadratna matrica čiji se elementi formiraju na sledeći način:

Na glavnoj dijagonali su elementi tipa \underline{Y}_{ii} koji se nalaze kao zbir svih admitansi koje se susiču u tom čvoru uključujući i admitanse do nultih sabirnica (do tačke nultog potencijala), koje su u EES-u po prirodi stvari na potencijalu zemlje. Vandijagonalni elementi matrice admitansi su povezne, fizičke admitanse (koje povezuju čvorove od interesa), ali sa suprotnim znakom.

Matrica admitansi može se generisati i potpuno opšte, nezavisno od prethodnih jednostavnih pravila, putem korišćenja matrica incidencije koje odslikavaju zadatu topologiju mreža i preko primitivnih impedansi grana.

Za EES sa n sabirnica (čvorova) formira se kvadratna matrica admitansi čvorova reda $n \times n$. Fizički se ima $(n+1)$ sabirnica, odnosno čvor, računajući i čvor nultog potencijala ili sabirnice nultog potencijala.

Ključne osobine matrice admitansi su:

- to je simetrična, kvadratna matrica: $\underline{Y}_{ik} = \underline{Y}_{ki}$, osim u slučaju postojanja regulacionih transformatora čija ekvivalentna šema unosi nesimetriju;
- to su retke matrice (pošto u njihovoj strukturi postoji veliki broj nultih elemenata) ili slabo popunjene matrice, sa tipičnom popunjenošću od svega nekoliko procenata za velike mreže.

Važno je ukazati da se i ova matrica vrlo uspešno koristi u proračunima struja kratkih spojeva, kada su u pitanju mreže velike dimenzionalnosti. Diskusija koja je matrica pogodnija za koju vrstu proračuna biće data u kasnijem izlaganju. O matrici admitansi čvorova biće više govora u delu analize koji se bavi tokovima snaga.

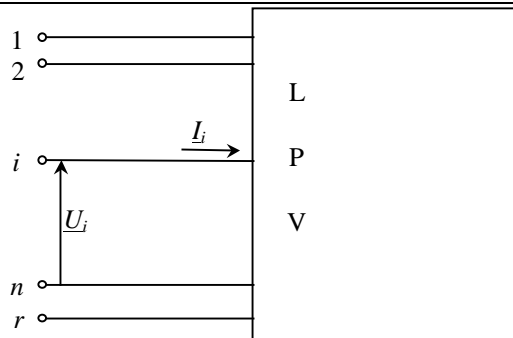
7.1.1. Formiranje matrice impedansi čvorova

Matrica impedansi čvorova može se formirati formalnom logikom putem inverzije matrice admitansi čvorova, odnosno kao $\underline{Z}_{\check{c}v} = \underline{Y}_{\check{c}v}^{-1}$. Međutim, ovakav postupak je numerički veoma složen kod velikih sistema i po pravilu se izbegava, osim za školske potrebe na primerima male dimenzionalnosti.

Drugi postupak, koji se za inženjerske primene koristi u proračunima struja kratkih spojeva u analizi EES-a, je algoritam tipa *korak po korak*, odnosno algoritam zasnovan na proceduri formiranja (građenja, *building algorithm*) matrice impedansi. Ovaj algoritam funkcioniše tako da se formira matrica impedansi čvorova za ma kako složenu mrežu polazeći od najjednostavnije strukture (od jedne grane) i postupno dodajući po svaku narednu granu. U principu se kod realizacije ovog algoritma polazi od strukture linearnog pasivnog višekrajnika (LPV).

Za ovakav višekrajnik (treba istaći da je pasivan, tj. bez izvora tako da je osobina reciprociteta očuvana) postoji, linearna veza između napona i struja koja za pozitivne smerove prema sl. 7.1 izgleda ovako:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{11} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{12} \underline{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{1n} \underline{I}_n \\ \underline{U}_2 &= \underline{Z}_{21} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{22} \underline{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{2n} \underline{I}_n \\ &\vdots \\ \underline{U}_i &= \underline{Z}_{i1} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{i2} \underline{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{in} \underline{I}_n \\ &\vdots \\ \underline{U}_n &= \underline{Z}_{n1} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{n2} \underline{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{nn} \underline{I}_n \end{aligned} \quad (7.1a)$$



Sl. 7.1 Linearni pasivni višekrajnik (LPV) sa svojim krajevima

Prethodne relacije se ispisuju u matrično – vektorskoj notaciji:

$$\underline{U} = \underline{Z}_{\check{c}v} \underline{I} \quad (7.1b)$$

gde je matrica impedansi čvorova:

$$\underline{Z}_{\check{c}v} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (7.1c)$$

Elementi matrice impedansi čvorova mogu se izračunavati preko sledećeg definicionog obrasca:

$$Z_{ij} = \left. \frac{U_i}{I_j} \right|_{I_k=0} \quad \text{gde je } k = 1, 2, \dots, n \quad (k \neq j) \quad (7.2)$$

Osobina matrice impedansi čvorova koja sledi iz činjenice da je višekrajnik linearan i pasivan, jeste osobina reciprociteta, odnosno za elemente matrice se ima $Z_{ij} = Z_{ji}$, tj. matrica impedansi je simetrična. Nadalje, važno je ukazati da je matrica impedansi čvorova puna matrica za povezane mreže.

Za praktično formiranje matrice impedansi čvorova (odnosno za primenu algoritma *korak po korak*) važno je poštovati dva polazna zahteva:

- matrica se formira polazeći od elementarne strukture (elementarna struktura je bukvalno jedna grana),
- male promene u strukturi mreže ne smeju zahtevati ponovno formiranje matrice impedansi čvorova, već se nova matrica impedansi mora formirati preko jednostavnih modifikacija već poznate matrice impedansi čvorova.

Upravo se u proceduri *korak po korak* polazi od dodavanja grane, sa impedansom Z_{gr} , na već prethodno poznatu matricu (*pre*) impedansi čvorova \underline{Z}^{pre} , dimenzija ($n \times n$). Rezultat je generisanje nove, posledične (*post*) matrice \underline{Z}^{post} . Referentni čvor r u EES-u ima potencijal 0, prema tome smisao termina *referentni* je da ukazuje na sabirnice nultog potencijala.

Pažljivom inspekcijom moguće je uočiti tri tipa čvorova relevantna za proceduru *korak po korak*:

- stari čvorovi,
- novi čvorovi koji nastaju dodavanjem grane,
- referentni čvor.

Dodavanjem grane impedanse Z_{gr} mogu se uočiti četiri netrivialna slučaja, tj. četiri tipa modifikacije matrice impedansi čvorova i peti tip modifikacije kod koga se uvažava i međusobna magnetna sprega:

- dodavanje grane sa impedansom Z_{gr} između nove i referentne sabirnice,
- dodavanje grane sa impedansom Z_{gr} između nove i stare sabirnice,
- dodavanje grane sa impedansom Z_{gr} između stare i referentne sabirnice i
- dodavanje grane sa impedansom Z_{gr} između dve stare sabirnice.

U narednoj analizi sa j , i biće obeleženi simboli starih sabirnica; k je simbol nove sabirnice a r je simbol referentne sabirnice.

7.1.2. Prvi tip modifikacije

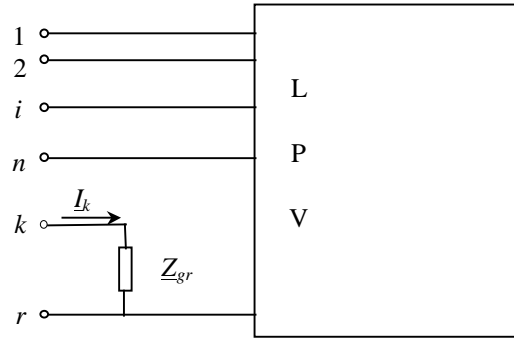
Prvi tip modifikacije sastoji se u dodavanju grane sa impedansom Z_{gr} između nove sabirnice indeksa k i referentne sabirnice indeksa r , na način kako je ilustrovano na sl. 7.2.

Za ovaj tip modifikacije očevidno je da se može napisati sledeća jednačina:

$$\underline{U}_k = \underline{Z}_{gr} \underline{I}_k \quad (7.3)$$

Kako struja I_k ne utiče na vrednosti napona na ostalim krajevima (izvodima) to se prethodna jednačina može shvatiti kao jednačina broj $(n+1)$ u sistemu jednačina ispisanom prethodno za n -sabirnički sistem. Prema tome, nenulti element se u ovoj jednačini pojavljuje samo na poziciji $(n+1)$, tako da je nova matrica impedansi, \underline{Z}^{post} , sigurno reda $(n+1) \times (n+1)$ sa formom kao u narednoj relaciji:

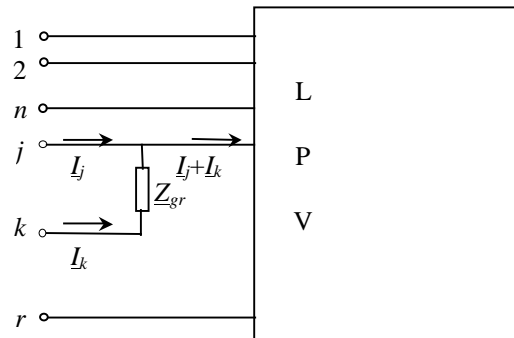
$$\underline{Z}^{post} = \begin{bmatrix} & & & & 0 \\ & \underline{Z}^{pre} & & & 0 \\ & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & & \underline{Z}_{gr} \end{bmatrix} \quad (7.4)$$



Sl. 7.2 Ilustracija prvog tipa modifikacije

7.1.3. Drugi tip modifikacije

Drugi tip modifikacije se sastoji u dodavanju grane sa impedansom \underline{Z}_{gr} između nove sabirnice indeksa k i stare sabirnice indeksa j , kao što je prikazano na sl. 7.3.



Sl. 7.3 Ilustracija drugog tipa modifikacije

Za ovu modifikaciju, odnosno za krajeve k i j , važi naponska jednačina:

$$\underline{U}_k = \underline{Z}_{gr} I_k + \underline{U}_j \quad (7.5)$$

Odnosno:

$$\underline{U}_k = \underline{Z}_{gr} I_k + \underline{Z}_{j1} I_1 + \underline{Z}_{j2} I_2 + \dots + \underline{Z}_{jj} (I_j + I_k) + \dots + \underline{Z}_{jn} I_n \quad (7.6a)$$

Posle preuređivanja prethodne relacije, dobija se:

$$\underline{U}_k = \underline{Z}_{j1} I_1 + \underline{Z}_{j2} I_2 + \dots + \underline{Z}_{jj} I_j + \dots + \underline{Z}_{jn} I_n + I_k (\underline{Z}_{jj} + \underline{Z}_{gr}) \quad (7.6b)$$

Prethodna jednačina se može shvatiti kao $(n+1)$ relacija u sistemu naponskih jednačina, odnosno kao relacija koja definiše $(n+1)$ red u novoj matrici impedansi čvorova. Naravno i ostale naponske jednačine se modifikuju. Tako za kraj indeksa 1 naponska jednačina postaje:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11} I_1 + \underline{Z}_{12} I_2 + \dots + \underline{Z}_{1j} I_j + \dots + \underline{Z}_{1n} I_n + \underline{Z}_{1j} I_k \quad (7.7)$$

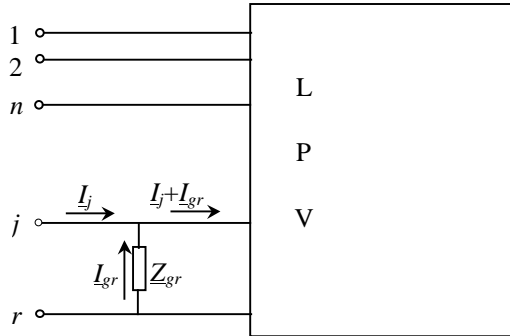
Kako se analogne jednačine mogu ispisati i za preostalih $(n-1)$ krajeva (izvoda), to je onda očigledno matrica \underline{Z}^{post} oblika:

$$\underline{Z}^{post} = \begin{bmatrix} \underline{Z}^{pre} & \begin{matrix} \underline{Z}_{1j} \\ \underline{Z}_{2j} \\ \vdots \\ \underline{Z}_{gr} + \underline{Z}_{jj} \end{matrix} \\ \underline{Z}_{j1} \quad \underline{Z}_{j2} \quad \cdots & \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

Dimenzije nove matrice impedansi se i u ovom slučaju povećavaju na $(n+1) \times (n+1)$, jer je uveden novi čvor u analizu.

7.1.4. Treći tip modifikacije

Treći tip modifikacije se sastoji u dodavanju grane sa impedansom \underline{Z}_{gr} između stare sabirnice indeksa j i referentne sabirnice indeksa r , kao što je prikazano na sl. 7.4.



Sl. 7.4 Ilustracija trećeg tipa modifikacije

Za ovaj slučaj modifikacije ispisuje se najpre naponska jednačina za i -ti kraj, kao reprezent svih krajeva:

$$\underline{U}_i = \underline{Z}_{i1} \underline{I}_1 + \cdots + \underline{Z}_{ij} (\underline{I}_j + \underline{I}_{gr}) + \cdots + \underline{Z}_{in} \underline{I}_n \quad (7.9a)$$

Ova jednačina je uobičajene strukture, s tim da je struja na kraju j promenjena. Analogne jednačine se ispisuju i za sve ostale krajeve, a za j -ti kraj pored toga važi naponska jednačina:

$$\underline{U}_j = -\underline{Z}_{gr} \underline{I}_{gr} \quad (7.10)$$

Za ovaj tip modifikacije karakteristično je da nije uveden novi čvor pa se zaključuje da će dimenzije nove (*post*) matrice ostati jednake dimenzijama stare (*pre*) matrice. Struja \underline{I}_{gr} koja se pojavljuje u prethodnim vezama je prema tome višak informacija (redundantna informacija) i nju treba eliminisati iz sistema prethodnih jednačina.

Kombinujući jednačinu (7.9a), ali napisanu za j -ti pristup, sa jednačinom (7.10) dobija se:

$$0 = \underline{Z}_{j1} \underline{I}_1 + \cdots + \underline{Z}_{jn} \underline{I}_n + (\underline{Z}_{jj} + \underline{Z}_{gr}) \underline{I}_{gr} \quad (7.9b)$$

Odakle se nalazi struja \underline{I}_{gr} kao :

$$\underline{I}_{gr} = -\frac{1}{\underline{Z}_{jj} + \underline{Z}_{gr}} [\underline{Z}_{j1} \underline{I}_1 + \cdots + \underline{Z}_{jn} \underline{I}_n] \quad (7.11)$$

Ako se \underline{I}_{gr} iz (7.11) zameni u sve relacije tipa (7.9a), tada se za i -ti pristup dobija:

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{Z}_{i1} \underline{I}_1 + \cdots + \underline{Z}_{ij} \underline{I}_j + \cdots + \underline{Z}_{in} \underline{I}_n + \underline{Z}_{ij} \underline{I}_{gr} = \\ &= \underline{Z}_{i1} \underline{I}_1 + \cdots + \underline{Z}_{ij} \underline{I}_j + \cdots + \underline{Z}_{in} \underline{I}_n + \underline{Z}_{ij} \left(-\frac{1}{\underline{Z}_{jj} + \underline{Z}_{gr}} \right) \times \\ &\quad \times [\underline{Z}_{j1} \underline{I}_1 + \cdots + \underline{Z}_{jn} \underline{I}_n] \end{aligned} \quad (7.12)$$

Jednačine oblika (7.12) ispisuju se za sve izvode. Kao posledica ima se sledeća struktura nove matrice impedansi:

$$\underline{Z}^{post} = \underline{Z}^{pre} - \frac{1}{\underline{Z}_{jj} + \underline{Z}_{gr}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{1j} \\ \underline{Z}_{2j} \\ \vdots \\ \underline{Z}_{nj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{j1} & \underline{Z}_{j2} & \cdots & \underline{Z}_{jn} \end{bmatrix} \quad (7.13)$$

Objašnjenje trećeg tipa modifikacije moguće je dati i pomoću postupka Kronove redukcije kojim se generalno problemi veće dimenzionalnosti svode na probleme manje dimenzionalnosti. Polazi se od sledeće matrične relacije kojom se definiše prošireni problem:

$$\begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}^{pre} & \underline{A} \\ \underline{B} & \underline{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I} \\ \underline{I}_{gr} \end{bmatrix} \quad (7.14)$$

U prethodnoj jednačini oznake imaju sledeće značenje:

\underline{U} - vektor napona od interesa,

\underline{I} - matrica kolona (vektor) struja od interesa,

\underline{I}_{gr} - matrica kolona (vektor) struja koje je potrebno eliminisati.

Matrica proširenog problema je podeljena na submatrice (particije): $\underline{A}, \underline{B}$ i \underline{C} koje je neophodno u svakom konkretnom slučaju prepoznati.

U konkretnom primeru \underline{C} je submatrica dimenzija 1×1 i predstavlja skalar, a \underline{I}_{gr} je jednodimenzioni vektor, pa se tako zadatak svodi na eliminaciju struje \underline{I}_{gr} . Razvijanjem relacije (7.14) dobija se:

$$\underline{U} = \underline{Z}^{pre} \underline{I} + \underline{A} \underline{I}_{gr} \quad (7.15a)$$

$$\underline{0} = \underline{B} \underline{I} + \underline{C} \underline{I}_{gr} \quad (7.15b)$$

Iz relacije (7.15b) direktno se nalazi:

$$\underline{I}_{gr} = -\underline{C}^{-1} \underline{B} \underline{I} \quad (7.16)$$

Ako se sada (7.16) smeni u (7.15a) dobija se:

$$\underline{U} = \left\{ \underline{Z}^{pre} - \underline{A} \underline{C}^{-1} \underline{B} \right\} \underline{I} \quad (7.17a)$$

Relacija (7.17a) povezuje veličine od interesa i nova (*post*) matrica se prosto nalazi preko naznačenih transformacija. Pošto je u konkretnom slučaju submatrica \underline{C} dimenzija 1×1 tada sledi da je:

$$\underline{Z}^{post} = \underline{Z}^{pre} - \frac{1}{\underline{C}} \underline{A} \underline{B} \quad (7.17b)$$

Dimenzije matrice \underline{Z}^{post} i \underline{Z}^{pre} su $(n \times n)$, dimenzije matrice \underline{A} su $(n \times 1)$ a matrice \underline{B} su $(1 \times n)$.

Iz poslednjeg izraza se lako prepoznaje struktura matrice \underline{Z}^{post} koja je identična već izvedenoj formi za novu matricu impedansi u relaciji (7.13). Suština kod ovog trećeg tipa modifikacije svodi se na eliminaciju struje \underline{I}_{gr} , kao $(n+1)$ struje, koja za sistem sa n pristupa zaista predstavlja redundantnu informaciju.

7.1.5. Četvrti tip modifikacije

Četvrti tip modifikacije se sastoji u dodavanju grane sa impedansom \underline{Z}_{gr} između dve stare sabirnice, kao što je prikazano na sl. 7.5.

~~Najpre se uočava da su dimenzije matrice \underline{Z}^{post} jednake dimenzijama matrice \underline{Z}^{pre} , kao što je to bio slučaj i kod treće modifikacije. Ispisuje se najpre jednačina za pristup 1:~~

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{12} \underline{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{1i} (\underline{I}_i + \underline{I}_{gr}) + \underline{Z}_{1j} (\underline{I}_j - \underline{I}_{gr}) + \dots + \underline{Z}_{1n} \underline{I}_n \quad (7.18a)$$

U zaključku treba konstatovati da se uočena četiri tipa modifikacija koriste za formiranje matrica impedansi čvorova sva tri redosleda, direktnog, inverznog i nultog (d,i,o) u EES-u. Algoritam formiranja matrice impedansi funkcioniše na sledeći način:

Polazi se od elementarne konfiguracije (odnosno od jedne grane), za koju se matrica impedansi poznaje direktno. Zadatak dodavanja (proširivanja) stare matrice impedansi vrši se prema prethodno izloženim složenim modifikacijama. Postupak se zove, kako je to već rečeno, formiranje matrice impedansi čvorova, $\underline{Z}_{\check{c}v}$, algoritmom *korak po korak*.

U prethodnom delu razmotreni su postupci dodavanja grane. Što se tiče postupaka oduzimanja grane, procedura je analogna s tim što se u paralelu dodaje grana sa impedansom ($-\underline{Z}_{gr}$), pa je rezultatna impedansa između ta dva čvora beskonačno velika, odnosno ima se prekid grane.

7.1.6. Peti tip modifikacije

Peti tip modifikacije se razlikuje od prethodnih jer uvodi u razmatranje i međusobnu impedansu kroz koju se manifestuje magnetna sprega. Za ovaj tip modifikacije skup indeksa starih sabirnica biće (i, j, p, q) .

Peti tip modifikacije se sastoji u dodavanju dve grane sa impedansama \underline{Z}_{gr1} i \underline{Z}_{gr2} između četiri čvora i, j, p i q kao što je ilustrovano na sl. 7.6.

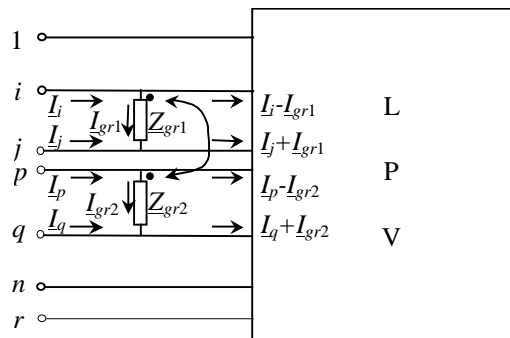
Kako se kod petog tipa modifikacije ne uvodi novi čvor, to se zaključuje da će dimenzije matrice impedansi posle modifikacije \underline{Z}^{post} biti jednake dimenzijama matrice impedansi pre modifikacije \underline{Z}^{pre} .

Polazeći od osnovne naponske jednačine za krajeve i i j , a vodeći računa da obe struje \underline{I}_{gr1} i \underline{I}_{gr2} izlaze iz tačaka, dobija se:

$$\underline{U}_i = \underline{U}_j + \underline{Z}_{gr1} \underline{I}_{gr1} + \underline{Z}_m \underline{I}_{gr2} \quad (7.24a)$$

odnosno:

$$0 = \underline{U}_j - \underline{U}_i + \underline{Z}_{gr1} \underline{I}_{gr1} + \underline{Z}_m \underline{I}_{gr2} \quad (7.24b)$$



Sl. 7.6 Ilustracija petog tipa modifikacije

Saglasno sa sl. 7.6 za napone \underline{U}_i i \underline{U}_j se ima:

$$\underline{U}_i = \underline{Z}_{i1} \underline{I}_1 + \dots + \underline{Z}_{ii} (\underline{I}_i - \underline{I}_{gr1}) + \underline{Z}_{ij} (\underline{I}_j + \underline{I}_{gr1}) + \dots + \underline{Z}_{ip} (\underline{I}_p - \underline{I}_{gr2}) + \underline{Z}_{iq} (\underline{I}_q + \underline{I}_{gr2}) + \dots + \underline{Z}_{in} \underline{I}_n \quad (7.25a)$$

$$\underline{U}_j = \underline{Z}_{j1} \underline{I}_1 + \dots + \underline{Z}_{ji} (\underline{I}_i - \underline{I}_{gr1}) + \underline{Z}_{jj} (\underline{I}_j + \underline{I}_{gr1}) + \dots + \underline{Z}_{jp} (\underline{I}_p - \underline{I}_{gr2}) + \underline{Z}_{jq} (\underline{I}_q + \underline{I}_{gr2}) + \dots + \underline{Z}_{jn} \underline{I}_n \quad (7.25b)$$

Zamenom (7.25a) i (7.25b) u (7.24b) i preuređenjem dobija se:

$$0 = (\underline{Z}_{j1} - \underline{Z}_{i1}) \underline{I}_1 + \dots + (\underline{Z}_{jn} - \underline{Z}_{in}) \underline{I}_n + (\underline{Z}_{gr1} + \underline{Z}_{ii} + \underline{Z}_{jj} - 2\underline{Z}_{ij}) \underline{I}_{gr1} + (\underline{Z}_m + \underline{Z}_{ip} - \underline{Z}_{iq} - \underline{Z}_{jp} + \underline{Z}_{jq}) \underline{I}_{gr2} \quad (7.26)$$

Osnovna naponska jednačina za krajeve p i q je:

$$\underline{U}_p = \underline{U}_q + \underline{Z}_{gr2} \underline{I}_{gr2} + \underline{Z}_m \underline{I}_{gr1} \quad (7.27a)$$

odnosno:

$$0 = \underline{U}_q - \underline{U}_p + \underline{Z}_{gr2} \underline{I}_{gr2} + \underline{Z}_m \underline{I}_{gr1} \quad (7.27b)$$

Ako se relacije oblika (7.25a) i (7.25b), ali primenjene na čvorove p i q , smene u (7.27b) tada se posle preuređenja i grupisanja članova dobija:

$$0 = (\underline{Z}_{q1} - \underline{Z}_{p1})\underline{I}_1 + \dots + (\underline{Z}_{qn} - \underline{Z}_{pn})\underline{I}_n + (\underline{Z}_m + \underline{Z}_{pi} - \underline{Z}_{pj} - \underline{Z}_{qi} + \underline{Z}_{qj})\underline{I}_{gr1} + (\underline{Z}_{gr2} + \underline{Z}_{pp} + \underline{Z}_{qq} - 2\underline{Z}_{pq})\underline{I}_{gr2} \quad (7.28)$$

Jednačine (7.26) i (7.28) su eliminatorne jednačine za struje \underline{I}_{gr1} i \underline{I}_{gr2} . Elemnti proširene matrične jednačine su oblika:

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \vdots \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} \quad \underline{I} = \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \vdots \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} \quad \underline{I}_{gr} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{gr1} \\ \underline{I}_{gr2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.29a)$$

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} (\underline{Z}_{1j} - \underline{Z}_{li}) & (\underline{Z}_{1q} - \underline{Z}_{lp}) \\ (\underline{Z}_{2j} - \underline{Z}_{2i}) & (\underline{Z}_{2q} - \underline{Z}_{2p}) \\ \vdots & \vdots \\ (\underline{Z}_{nj} - \underline{Z}_{ni}) & (\underline{Z}_{nq} - \underline{Z}_{np}) \end{bmatrix} \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} (\underline{Z}_{j1} - \underline{Z}_{i1}) \dots (\underline{Z}_{jn} - \underline{Z}_{in}) \\ (\underline{Z}_{q1} - \underline{Z}_{p1}) \dots (\underline{Z}_{qn} - \underline{Z}_{pn}) \end{bmatrix} \quad (7.29b)$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{gr1} + \underline{Z}_{ii} + \underline{Z}_{jj} - 2\underline{Z}_{ij} & \underline{Z}_m + \underline{Z}_{pi} - \underline{Z}_{pj} - \underline{Z}_{qi} + \underline{Z}_{qj} \\ \underline{Z}_m + \underline{Z}_{ip} - \underline{Z}_{iq} - \underline{Z}_{jp} + \underline{Z}_{jq} & \underline{Z}_{gr2} + \underline{Z}_{pp} + \underline{Z}_{qq} - 2\underline{Z}_{pq} \end{bmatrix} \quad (7.29c)$$

Ako se sada iskoristi tehnika Kronove redukcije i prethodne matrične jednačine za submatrice, dobija se:

$$\begin{bmatrix} \underline{U} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}^{pre} & \underline{A} \\ \underline{B} & \underline{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I} \\ \underline{I}_{gr} \end{bmatrix} \quad (7.30)$$

Eliminacijom dvokomponentnog vektora \underline{I}_{gr} dobija se:

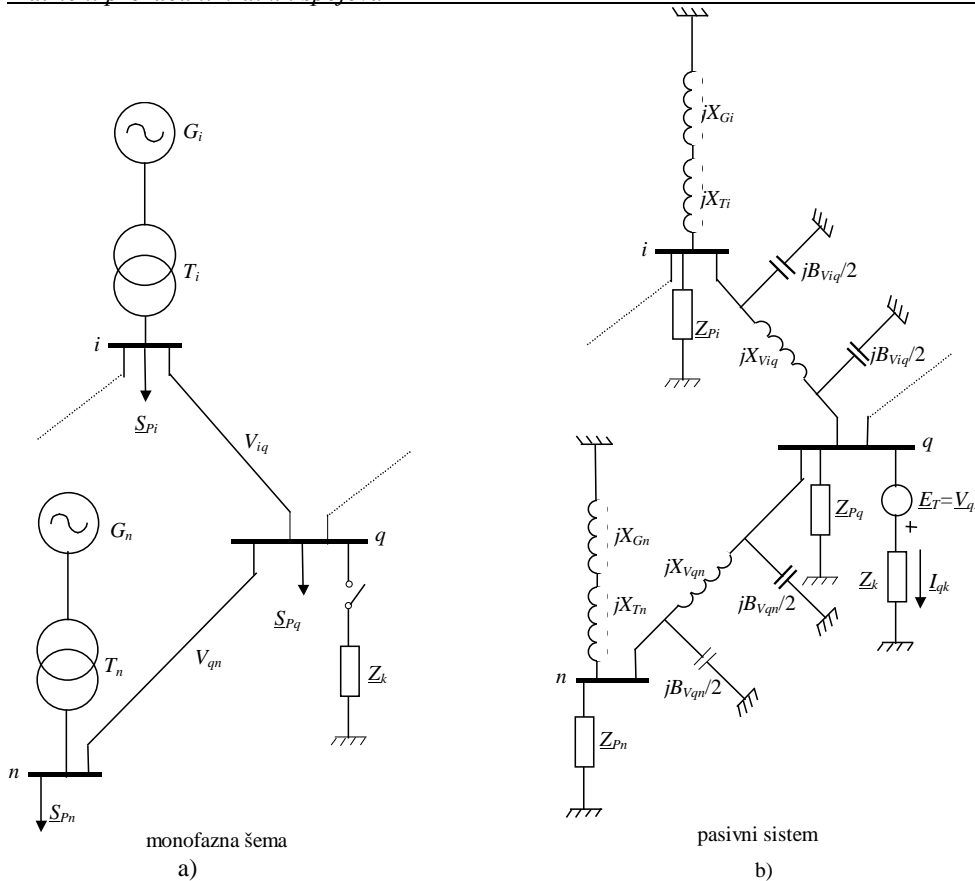
$$\underline{Z}^{post} = \underline{Z}^{pre} - \underline{A} \cdot \underline{C}^{-1} \cdot \underline{B} \quad (7.31)$$

7.2. Proračuni kratkih spojeva matričnim postupkom

Kod velikih EES praktični proračuni struja kratkih spojeva, odnosno napona po pojedinim sabirnicama u kvazistacionarnim stanjima za vreme trajanja kratkog spoja su nezamislivi bez računara. Iz tih razloga potrebno je raspolagati sa sistematizovanom bazom podataka kao polaznom osnovom za ove proračune (podaci o parametrima pojedinih sistema) kao i odgovarajućim matematičkim modelom, odnosno izrazima primerenim za n -sabirnički elektroenergetski sistem.

7.2.1. Proračuni trofaznih kratkih spojeva matričnim postupkom pomoću matrice impedansi čvorova

U ovom delu će najpre biti izložen postupak proračuna simetričnih otočnih kvarova, dakle trofaznih kratkih spojeva, matričnim postupkom, za zadatak ilustrovan na sl. 7.7, korišćenjem matrice impedansi čvorova.



SI. 7.7 Primer sistema za proračune trofaznih kratkih spojeva matričnim postupkom

Pretpostavlja se da će se trofazni kratki spoj desiti na sabirnicama q . Na tim sabirnicama prikazana je strukturna promena sa jednom granom kojom se simulira kvar i čija je odgovarajuća impedansa kvara \underline{Z}_k . Radni naponi pre kvara formiraju n -dimenzioni vektor radnih napona, koji se po pretpostavci poznaje na osnovu proračuna tokova snaga. I kod proračuna napona i struja za vreme trajanja kratkog spoja matričnim postupkom najpre se formira Theveninov ekvivalent. Na sl. 7.2 vod koji povezuje sabirnice i i q obeležen je sa V_{iq} .

Saglasno prethodnim objašnjenjima Theveninov ekvivalent se formira tako da se sve *ems* u složenoj ekvivalentnoj šemi celog EES-a kratko spoje, a ostali elementi mreže (generatori, transformatori, vodovi i potrošači) se zamene odgovarajućim pasivnim ekvivalentnim šemama.

Na prethodnoj šemi su (šema pasivnog sistema), zbog pojednostavljenja, aktivne otpornosti generatora, transformatora i vodova zanemarene, dok su u impedansi potrošnje i u impedansi kvara aktivne otpornosti prisutne. Kompleksne snage potrošnje označene su sa \underline{S}_P (na sabirnicama i ta snaga je \underline{S}_{Pi}), a kompleksne impedanse potrošnje sa \underline{Z}_P . Naravno, imajući u vidu da je ovaj model u osnovi orijentisan na računarske primene ovakva zanemarenja nisu od nekih posebnih potreba, ali se u aproksimativnim proračunima uobičajeno tako radi kako bi se fizička slika problema uvažavala. Naime, ako se uzme u obzir da je u prenosnim mrežama tipičan odnos aktivne i reaktivne otpornosti za 220 kV vodove $R:X = 1:4$, a za 400 kV vodove čak $R:X = 1:11$, i nadalje ako se ima u vidu da je kod velikih interkonektivnih transformatora $R:X = 1:10 \div 1:20$, a kod ogromnih sinhronih generatora $R:X = 1:100$, onda se vidi da prethodna pojednostavljenja imaju smisla. Primećuje se da kako se ide od voda preko transformatora do generatora ovi odnosi sve više rastu.

Theveninova *ems* je jednaka faznom radnom naponu koji vlada na sabirnicama q , neposredno pre nastanku kvara. Na slici koja odgovara pasivnom sistemu, naponi sabirnica su jednaki, kako je to već prethodno objašnjeno pri primeni Theveninove teoreme, **promenama** napona koje su posledica strukturne modifikacije mreže na sabirnicama q . Te promene napona formiraju n -dimenzioni vektor promena napona koji se računa na pasivnom sistemu (zato indeks Δ za ove promene napona):

$$\Delta \underline{U} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_1 \\ \Delta \underline{U}_2 \\ \vdots \\ \Delta \underline{U}_q \\ \vdots \\ \Delta \underline{U}_n \end{bmatrix} \quad (7.32)$$

Analizirani n -sabirnički sistem na prethodnoj slici se može predstaviti preko matrice impedansi čvorova, $\underline{Z}_{\underline{c}v}$. Osnovna matrična jednačina pasivnog sistema povezuje struje injektiranja sa naponima čvorova (odnosno sa promenama napona):

$$\Delta \underline{U} = \underline{Z}_{cv} \underline{I} \quad (7.33)$$

U konkretnom slučaju ta matrična jednačina je primenjena na pasivni sistem. Vektor \underline{I} je n -dimenzioni vektor struja injektiranja. U pasivnom sistemu struja injektiranja postoji samo na sabirnicama koje su pogođene kvarom, a to su po pretpostavci sabirnice q . Elementi vektora \underline{I} su pozitivni kad su struje injektiranja usmerene ka sistemu, tako da je u posmatranom slučaju struja injektiranja negativna jer teče iz sistema u zemlju.

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_{qk} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.34)$$

Dakle, samo q -ta komponenta vektora struja injektiranja je različita od nule. Sa pasivnog sistema se nalaze elementi vektora $\Delta \underline{U}$ a zatim se nalaze naponi za vreme trajanja kvara, preko sabiranja radnih napona i promena napona:

$$\underline{U}_k = \underline{U}_r + \Delta \underline{U} \quad (7.35)$$

Ako se relacija (7.33) zameni u (7.35) dobija se:

$$\underline{U}_k = \underline{U}_r + \underline{Z}_{cv} \underline{I} \quad (7.36)$$

U jednačini (7.36) se ima ukupno $(n+1)$ nepoznata, i to n nepoznatih napona za vreme trajanja kvara, koji su u suštini principijelne nepoznate u ovim proračunima, i to su elementi vektora \underline{U}_k kao i struja koja teče u mesto kvara za vreme trajanja kvara, nenulti element vektora \underline{I} . Prema tome, kako se u jednačini (7.36) ima n skalarnih relacija, to je potrebna još jedna skalarna jednačina da bi se zatvorio problem u matematičkom smislu. Ta relacija je skalarna relacija na impedansi kvara, za vreme trajanja kvara:

$$\underline{U}_{qk} = \underline{Z}_k \underline{I}_{qk} \quad (7.37)$$

Razvijena forma matrične relacije (7.36) izgleda ovako:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1k} &= \underline{U}_{1r} - \underline{Z}_{1q} \underline{I}_{qk} \\ \underline{U}_{2k} &= \underline{U}_{2r} - \underline{Z}_{2q} \underline{I}_{qk} \\ &\vdots \\ \underline{U}_{qk} &= \underline{U}_{qr} - \underline{Z}_{qq} \underline{I}_{qk} \\ &\vdots \\ \underline{U}_{nk} &= \underline{U}_{nr} - \underline{Z}_{nq} \underline{I}_{qk} \end{aligned} \quad (7.38)$$

Ako se relacija (7.37) smeni u q -tu relaciju sistema (7.38) dobije se:

$$\underline{I}_{qk} = \frac{\underline{U}_{qr}}{\underline{Z}_k + \underline{Z}_{qq}} \quad (7.39)$$

Kako je brojilac u prethodnom izrazu, \underline{U}_{qr} , radni napon na sabirnicama q pre kvara, poznat iz proračuna tokova snaga, to se onda poznaje i struja kvara \underline{I}_{qk} . Vraćanjem relacije (7.39) u jednačine (7.38) dobijaju se konačni izrazi za napone za vreme trajanja kvara. Za sabirnice indeksa i kao opšti reprezent sabirnice važi:

$$\underline{U}_{ik} = \underline{U}_{ir} - \frac{\underline{Z}_{iq}}{\underline{Z}_k + \underline{Z}_{qq}} \underline{U}_{qr} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad i \neq q \quad (7.40)$$

Za sabirnice indeksa q (sabirnice u kvaru) važi:

$$\underline{U}_{qk} = \frac{\underline{Z}_k}{\underline{Z}_k + \underline{Z}_{qq}} \underline{U}_{qr} \quad (7.41a)$$

Ako je u pitanju metalni trofazni kratki spoj, tada je $\underline{Z}_k = 0$, pa sledi:

$$\underline{U}_{qk} = 0 \quad (7.41b)$$

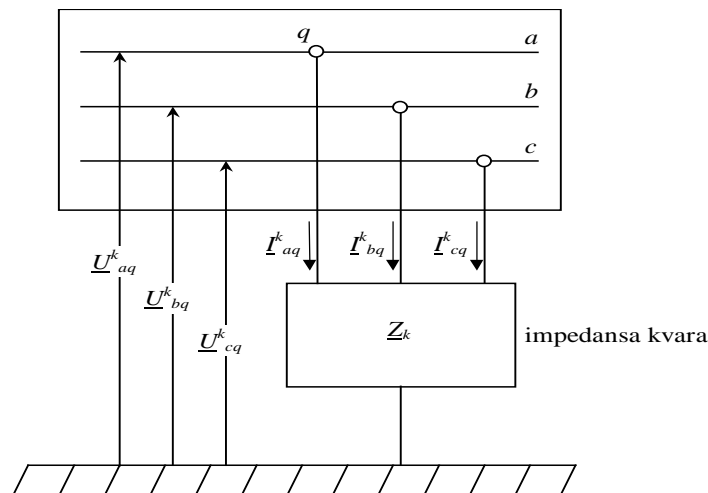
$$\underline{U}_{ik} = \underline{U}_{ir} - \frac{\underline{Z}_{iq}}{\underline{Z}_{qq}} \underline{U}_{qr} \quad (7.42)$$

U prethodnim formulama je sa \underline{Z}_{qq} označen element matrice impedansi čvorova na poziciji qq , dakle, element sa glavne dijagonale matrice impedansi čvorova. Formalno je to istovremeno i ekvivalentna Theveninova impedansa, \underline{Z}_T , a kako je ovde u pitanju trofazni kratki spoj, onda se ima samo direktni komponentni sistem, pa je to jednovremeno i ulazna impedansa direktnog komponentnog sistema viđena odočno sa mesta kvara:

$$\underline{Z}_{qq} \equiv \underline{Z}_T \equiv \underline{Z}_d^{ekv}.$$

7.2.2. Proračuni nesimetričnih kratkih spojeva matričnim postupkom pomoću matrice impedansi čvorova

Proračuni nesimetričnih kratkih spojeva matričnim postupkom predstavljaju najopštiji zadatak. Za ovaj generalni slučaj mora se i notaciji posvetiti odgovarajuća pažnja. Radno stanje, kao i do sada, biće obeležavano sa indeksom r a stanje za vreme trajanja kvara sa indeksom k , dok veličine pridružene stanju na pasivnom sistemu, tj. na Theveninovom ekvivalentu, biće obeležavane sa T . Indeksi koji su pridruženi odgovarajućim direktnim, inverznim i nultim simetričnim komponentama su: d, i, o .

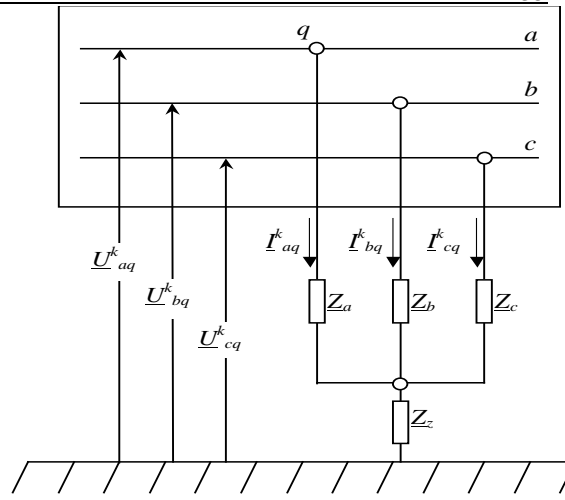


Sl. 7.8 Predstava impedanse kvara u opštem slučaju

Sabirnice (čvorovi) u EES-u biće obeleženi indeksima 1 do n (sl. 7.7). Naravno, sabirnice na potencijalu zemlje su linearno strujno zavisne sabirnice i one su u stvari indeksa $n+1$. Faze EES-a biće obeležene sa a, b i c .

EES je određen poznavanjem matrice impedansi čvorova $\underline{Z}_{čv}$. Nesimetričan kvar se po pretpostavci dešava na sabirnicama q , sl. 7.8.

Priroda (vrsta) kvara mora biti potpuno određena i formalno se to može svesti na poznavanje matrice otočnih impedansi kvara \underline{Z}_k . Ovim pristupom može se postići potpuna generalizacija proračuna, sl. 7.9.



Sl. 7.9 Predstava impedanse kvara u razvijenom obliku

Osnovna naponska jednačina, na osnovu sl. 7.9, je oblika:

$$\underline{U}_{aq}^k = \underline{I}_{aq}^k \underline{Z}_a + (\underline{I}_{aq}^k + \underline{I}_{bq}^k + \underline{I}_{cq}^k) \underline{Z}_z \quad (7.43)$$

Ili u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{aq}^k \\ \underline{U}_{bq}^k \\ \underline{U}_{cq}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_a + \underline{Z}_z & \underline{Z}_z & \underline{Z}_z \\ \underline{Z}_z & \underline{Z}_b + \underline{Z}_z & \underline{Z}_z \\ \underline{Z}_z & \underline{Z}_z & \underline{Z}_c + \underline{Z}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{aq}^k \\ \underline{I}_{bq}^k \\ \underline{I}_{cq}^k \end{bmatrix} \quad (7.44)$$

U prethodnim relacijama sa superskriptom k obeležavano je stanje za vreme trajanja kvara. Treba uočiti da je i matrica otočnih impedansi kvara obeležena indeksom k . Ova matrica sadrži u svojoj strukturi otočne elemente po fazama (\underline{Z}_a , \underline{Z}_b , \underline{Z}_c) i zajednički otočni element, impedansu prema zemlji \underline{Z}_z čija priroda može da bude različita (npr. impedansa luka). Ovakva generalizacija omogućava da se ma koji poseban slučaj otočnog kvara generiše veoma jednostavno. Tako se slučajevi tipičnih kvarova dobijaju kao:

- jednofazni kratki spoj (k1Z) se ima ako je: $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \infty$ a $\underline{Z}_a = \underline{Z}_z = 0$,
- dvofazni kratki spoj sa zemljom (k2Z) se ima ako je: $\underline{Z}_a = \infty$ a $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_z = 0$.
- dvofazni kratki spoj (k2) se ima ako je: $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = 0$ a $\underline{Z}_a = \underline{Z}_z = \infty$,

Prelaz od matrice \underline{Z}_k kao simetrične matrice u koordinatama faznih veličina, na odgovarajuću matricu sa simetričnim komponentama vrši se primenom već objašnjenih postupaka.

U faznim koordinatama opšta jednačina na impedansi kvara, odnosno jednačina (7.44) u matričnoj notaciji izgleda ovako:

$$\underline{U}_{kq}^{a,b,c} = \underline{Z}_k \underline{I}_{kq}^{a,b,c} \quad (7.45)$$

gde je $\underline{I}_{kq}^{a,b,c}$ vektor struje kvara na sabirnicama q u faznim koordinatama.

Ova relacija se prevodi u koordinate simetričnih komponenta primenom matrice transformacije \underline{F} i množenjem tako dobijene jednačine sa inverzijom ove matrice, a kako je pokazano u narednoj relaciji:

$$\underline{F} \underline{U}_{kq}^{d,i,o} = \underline{Z}_k \underline{F} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} / \underline{F}^{-1} \quad (7.46)$$

$$\underline{U}_{kq}^{d,i,o} = \underline{F}^{-1} \underline{Z}_k \underline{F} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} \quad (7.47a)$$

$$\underline{U}_{kq}^{d,i,o} = \underline{Z}_k^{d,i,o} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} \quad (7.47b)$$

Matrica impedansi kvara u koordinatama simetričnih komponenti uvodi se na osnovu poređenja relacija (7.47a) i (7.47b):

$$\underline{Z}_k^{d,i,o} = \underline{F}^{-1} \underline{Z}_k \underline{F} \quad (7.48a)$$

Posle naznačenih izračunavanja dobija se:

$$\underline{Z}_k^{d,i,o} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c & \underline{Z}_a + \underline{a}^2 \underline{Z}_b + \underline{a} \underline{Z}_c & \underline{Z}_a + \underline{a} \underline{Z}_b + \underline{a}^2 \underline{Z}_c \\ \underline{Z}_a + \underline{a} \underline{Z}_b + \underline{a}^2 \underline{Z}_c & \underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c & \underline{Z}_a + \underline{a}^2 \underline{Z}_b + \underline{a} \underline{Z}_c \\ \underline{Z}_a + \underline{a}^2 \underline{Z}_b + \underline{a} \underline{Z}_c & \underline{Z}_a + \underline{a} \underline{Z}_b + \underline{a}^2 \underline{Z}_c & \underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c + 9 \underline{Z}_z \end{bmatrix} \quad (7.48b)$$

Očigledno da matrica u (7.48b) nije simetrična.

Pored matrice impedansi kvara ponekad je korisno uvesti u razmatranje i matricu admitansi kvara $\underline{Y}_k^{d,i,o}$ kojom se izbegava problem beskonačno velikih vrednosti pojedinih impedansi.

Osnovni zadatak u proračunima kvazistacionarnih stanja za vreme trajanja kratkog spoja je nalaženje struja i napona, kako na sabirnicama koje su pogođene kvarom, tako i na svim ostalim sabirnicama. Kako su osnovne nepoznate kod proračuna struja kratkih spojeva naponi za vreme trajanja kvara i pošto su oni vezani sa strujama injektiranja preko matrice impedansi čvorova, to se zaključuje da je matrica impedansi čvorova u principu nešto logički pogodnija kod proračuna kratkih spojeva (kod proračuna raspodela snaga matrica admitansi je osnovna matrica).

U opštem slučaju kod nesimetričnih kvarova, matrica impedansi čvorova je dimenzija $(3n \times 3n)$ i prema tome ona se ispisuje za sva tri redosleda simetričnih komponenti, direktan, inverzan i nulti: $\underline{Z}_{\check{c}v}^{d,i,o}$.

Analogno se naponi i struje predstavljaju kao $3n$ -dimenzioni vektori po sabirnicama indeksa $1, 2, \dots, q, \dots, n$, odnosno kao:

$$\underline{U}^{d,i,o} = \begin{bmatrix} \underline{U}_1^d \\ \underline{U}_1^i \\ \underline{U}_1^o \\ \underline{U}_2^d \\ \underline{U}_2^i \\ \underline{U}_2^o \\ \vdots \\ \underline{U}_n^d \\ \underline{U}_n^i \\ \underline{U}_n^o \end{bmatrix} \quad (7.49) \quad \underline{I}^{d,i,o} = \begin{bmatrix} \underline{I}_1^d \\ \underline{I}_1^i \\ \underline{I}_1^o \\ \underline{I}_2^d \\ \underline{I}_2^i \\ \underline{I}_2^o \\ \vdots \\ \underline{I}_n^d \\ \underline{I}_n^i \\ \underline{I}_n^o \end{bmatrix} \quad (7.50)$$

U kompaktnoj matričnoj notaciji osnovna matrična jednačina postaje:

$$\underline{U}^{d,i,o} = \underline{Z}_{\check{c}v} \underline{I}^{d,i,o} \quad (7.51)$$

U relaciji (7.51) se ima $3n$ skalarnih jednačina (n u direktnom, n u inverznom i n u nultom komponentnom sistemu). Ova matrična veza primenljiva je i za radno stanje, i za stanje za vreme trajanja kvara, kao i za stanje na pasivnom sistemu, i samo se formalno menjaju indeksi koji određuju ova stanja

Umesto prethodnog načina ispisivanja relacija, nesimetrični kvarovi se mogu modelovati i preko n -dimenzionih matričnih relacija. Međutim, kod ovakve interpretacije svaki od elemenata odgovarajućih vektora ima tri sub-elementa, koji sadrže informacije o d, i, o komponentnim sistemima. Razvijena skalarna relacija za sabirnice indeksa j u tom slučaju izgleda ovako:

$$\underline{U}_j^{d,i,o} = \underline{Z}_{j1}^{d,i,o} \underline{I}_1^{d,i,o} + \underline{Z}_{j2}^{d,i,o} \underline{I}_2^{d,i,o} + \dots + \underline{Z}_{jj}^{d,i,o} \underline{I}_j^{d,i,o} + \dots + \underline{Z}_{jn}^{d,i,o} \underline{I}_n^{d,i,o} \quad (7.52)$$

Kod ovakvog pristupa, relacija (7.52), očividno je da se radi o vektorima koji sadrže po tri informacije.

Na osnovu ovakvih razmatranja i na osnovu podataka o matrici impedansi kvara moguće je dati generalne formule za izračunavanje struja i napona za vreme trajanja kvara po svim sabirnicama i po svim granama. Pretpostavlja se da do nesimetričnog kvara dolazi iz simetričnog radnog stanja, a to znači da radnom stanju odgovara vektor napona u kojem su samo direktne komponente različite od nule. Prema tome ima se:

$$\underline{U}_r^{d,i,o} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{1r}^d \\ 0 \\ 0 \\ \underline{U}_{2r}^d \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \underline{U}_{nr}^d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.53)$$

Prema prethodnim razmatranjima moguće je za izračunavanje napona za vreme trajanja kvara napisati generalnu relaciju koja uvažava princip superpozicije:

$$\underline{U}_k^{d,i,o} = \underline{U}_r^d + \underline{Z}_{\check{c}v}^{d,i,o} \underline{I}_k^{d,i,o} \quad (7.54)$$

Matrica impedansi čvorova sistema, $\underline{Z}_{\check{c}v}$, je matrica impedansi kojom se modeluje cela mreža, odnosno ceo sistem, dok je \underline{Z}_k matrica impedansi kvara. Vektor struja injektiranja u poslednjoj relaciji ima nenulti element samo na poziciji q , pošto su samo sabirnice q pogođene kvarom. U ekvivalentnoj šemi koja odgovara stanju kad se cela mreža učini pasivnom, jedina nenulta struja injektiranja sa negativnim znakom se prema tome ima samo na sabirnicama pogođenim kvarom:

$$\underline{I}_k^{d,i,o} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -\underline{I}_{kq}^{d,i,o} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.55)$$

Poređenjem sa proračunima pri trofaznom kratkom spoju vidi se da je ključna razlika u odnosu na simetričan slučaj tri puta veća dimenzionalnost problema. U matričnoj relaciji (7.54) nepoznate veličine figurišu sa leve strane i to su naponi za vreme trajanja kvara. Struje injektiranja u sva tri komponentna sistema mogu se naći posle naredne analize. Relacija (7.54) se najpre razvije po komponentama:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{k1}^{d,i,o} &= \underline{U}_{r1}^d - \underline{Z}_{1q}^{d,i,o} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} \\ \underline{U}_{k2}^{d,i,o} &= \underline{U}_{r2}^d - \underline{Z}_{2q}^{d,i,o} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} \\ &\vdots \\ \underline{U}_{kq}^{d,i,o} &= \underline{U}_{rq}^d - \underline{Z}_{qq}^{d,i,o} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} \\ &\vdots \\ \underline{U}_{kn}^{d,i,o} &= \underline{U}_{rn}^d - \underline{Z}_{nq}^{d,i,o} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} \end{aligned} \quad (7.56)$$

Svaka od relacija (7.56) sadrži po tri skalarnе relacije. Koristeći q -tu relaciju iz jednačina (7.56) u kombinaciji sa jednačinom na impedansi kvara:

$$\underline{U}_{kq}^{d,i,o} = \underline{Z}_k^{d,i,o} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} \quad (7.57)$$

može se eliminisati struja za vreme trajanja kvara na sabirnicama q . Izjednačavanjem desnih strana dobija se:

$$\underline{Z}_k^{d,i,o} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} = \underline{U}_{rq}^d - \underline{Z}_{qq}^{d,i,o} \underline{I}_{kq}^{d,i,o} \quad (7.58a)$$

odakle sledi:

$$\underline{I}_{kq}^{d,i,o} = \left(\underline{Z}_k^{d,i,o} + \underline{Z}_{qq}^{d,i,o} \right)^{-1} \underline{U}_{rq}^d \quad (7.58b)$$

Relacija (7.58b) omogućava izračunavanje struja u d,i,o komponentnom sistemu koje teku kroz mesto kvara. Ona sadrži po tri relacije. Zamenom relacije (7.58b) u relacije (7.56) dobijaju se definitivni izrazi za proračune napona svih sabirnica za vreme trajanja kvara:

$$\underline{U}_{kj}^{d,i,o} = \underline{U}_j^d - \underline{Z}_{jq}^{d,i,o} \left\{ \underline{Z}_k^{d,i,o} + \underline{Z}_{qq}^{d,i,o} \right\}^{-1} \underline{U}_{rq}^d \quad \text{za } j \neq q, j = 1, 2, \dots, n \quad (7.59a)$$

$$\underline{U}_{kq}^{d,i,o} = \underline{Z}_k^{d,i,o} \left\{ \underline{Z}_k^{d,i,o} + \underline{Z}_{qq}^{d,i,o} \right\}^{-1} \underline{U}_{rq}^d \quad \text{za } j = q \quad (7.59b)$$

Struje po granama za vreme trajanja kvara nalaze se na osnovu elementarne veze, tj. na osnovu poznatih napona čvorova i impedansi pojedinih grana.

Matrice tipa $\underline{Z}_{jq}^{d,i,o}$ su dijagonalne i nalaze se pomoću algoritma korak po korak primenjenog na ekvivalentne šeme direktnog, inverznog i nultog redosleda. Ove matrice je moguće izračunati i preko matrica admitansi, što se po pravilu za velike mreže pokazuje kao komplikovanije.

Matrice oblika $\underline{Z}_k^{d,i,o}$ nisu simetrične zbog razloga objašnjenih prilikom izračunavanja opšte impedanse kvara.

8. Modelovanje nadzemnog voda za potrebe proračuna struja kratkih spojeva

Za svaki od elemenata sistema potrebno je poznavati odgovarajući model primeren odabranoj metodi proračuna struja kratkih spojeva. Kako je metoda koja koristi Theveninov ekvivalent, simetrične komponente i super-poziciju, objektivno najviše zastupljena u proračunima kvazistacionarnih stanja za vreme trajanja kratkog spoja, to se postavlja zadatak da se impedanse direktnog, inverznog i nultog redosleda za sve elemente sistema pažljivo prouče. Naravno, od interesa je poznavati impedanse sva tri redosleda za vodove (nadzemne i kablovske), za transformatore, generatore, asinhronne motore i potrošačke centre u širem smislu reči. Podaci o ovim impedansama čine polaznu bazu podataka za formiranje matrice impedansi direktnog, inverznog i nultog redosleda. U narednom izlaganju upravo je poenta da se sačini pregled ovih impedansi i da se prezentiraju inženjerski koncepti njihovog proračuna.

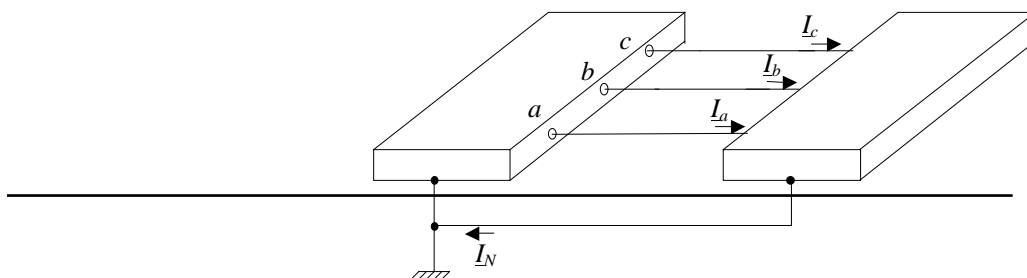
8.1. Redne impedanse nadzemnih vodova za nesimetrična radna stanja

Direktna impedansa nadzemnih vodova jednaka je inverznoj impedansi, pošto se ove impedanse ne razlikuju za statičke elemente sistema. Naravno, direktna aktivna otpornost poznaje se na osnovu tabličnih, odnosno fabričkih podataka proizvođača Al-Fe užadi i kao takva diskutovana je u delu udžbenika gde se govori o modelima elemenata generalno. Direktna reaktansa je takođe obrađena na istom mestu i ona predstavlja pogonsku (odnosno pofaznu) reaktansu koja reprezentuje trofazni simetrični vod kod proračuna stacionarnih, simetričnih stanja u monofaznoj šemi uvažavajući i magnetne uticaje ostalih dveju faza. Sa nultom reaktansom situacija je drugačija i osnovni cilj ovog izlaganja je da se nulte reaktanse, odnosno impedanse prouče.

Proučavanje nulte reaktanse, odnosno nalaženje povratnih puteva struje kroz zemlju, u principu nameće potrebu za opštim sagledavanjem impedansi rednih grana u ekvivalentnim šemama vodova. Naravno, problematika otočnih admitansi je takođe od interesa i biće naknadno izložena.

Uslov postojanja nultih struja na vodovima (ovde se ne misli na male kapacitivne struje) za vreme trajanja kratkog spoja (npr. jednofaznog k.s) svodi se na mogućnost proticanja povratne struje kroz zemlju. Nadzemni vod uvek polazi i završava u nekom od razvodnih postrojenja, sl. 8.1. Na sl. 8.1 faze dalekovoda od interesa su obeležene sa a , b i c i sa odgovarajućim faznim strujama, a povratna struja kroz neutralni provodnik (kroz zemlju) sa I_N . Da bi se moglo ustanoviti ima li uslova za proticanje povratne struje kroz zemlju, moraju se prema tome poznavati krajevi (terminali) dalekovoda, odnosno način uzemljenja zvezdišta u tim postrojenjima. Neutralni provodnik može predstavljati bukvalno četvrti fizički provodnik, ili taj provodnik čini neki povratni put kroz zemlju (fiktivni provodnik).

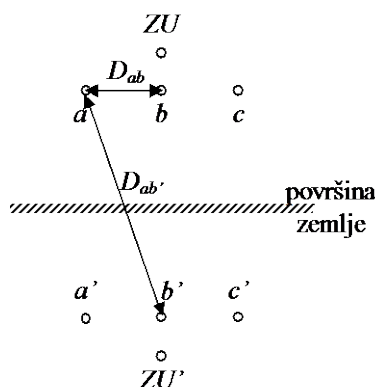
Ukoliko su zvezdišta transformatora koji se nalaze u razvodnim postrojenjima, a u kojima završava dalekovod, uzemljena na stranama incidentnim sa dalekovodom, tada se ima mogućnost proticanja struja kroz zemlju. Treba ponoviti da je ta mogućnost od interesa samo pri nesimetričnim stanjima na vodu. Kod simetričnih stanja zbir struja u faznim provodnicima je: $I_a + I_b + I_c = 0$, i struja kroz neutralni provodnik je: $I_N = 0$. Dakle, pri nesimetričnim stanjima ima se neka struja u neutralnom provodniku. Kao karakteristično nesimetrično stanje može se uzeti stanje za vreme trajanja jednofaznog kratkog spoja sa zemljom (k1Z). Pri proračunu jednofaznog kratkog spoja nesimetričan sistem se metodom simetričnih komponenti prevodi u tri simetrična, odnosno u direktni, inverzni i nulti komponentni (pod)sistem. Direktni i inverzni komponentni sistemi nisu od interesa sa aspekta povratne struje kroz zemlju. Kako pri jednofaznom kratkom spoju važi: $I_{ao} = I_{bo} = I_{co} = I_o$, to sledi da je $I_N = 3I_o$.



Sl. 8.1 Ilustracija krajeva nadzemnog voda u postrojenjima

U narednom objašnjenju započeće se sa slučajem trofaznog nadzemnog voda sa jednim zaštitnim užetom, sl. 8.2. Na sl. 8.2 fazni provodnici su obeleženi sa a , b i c a zaštitno uže sa ZU . Na ovom primeru pretpostavljen je raspored faznih provodnika u horizontalnoj ravni, a što je čest slučaj u praksi. Zaštitno uže, ili zaštitna užad, se koriste na nadzemnim vodovima sa ciljem sprečavanja direktnog udara groma u faze provodnike. Umesto termina zaštitno uže koriste se i termini zemljovodno uže ili neutralni provodnik. Iz tog razloga uže mora biti na potencijalu zemlje, a da bi se to ostvarilo uže se mora na određenim rastojanjima uzemljivati duž voda (jedna od mogućnosti je uzemljavanje na svakom stubu). Fazni provodnici a , b i c su, naravno, izolovani kako od zemlje tako i međusobno.

U ovim analizama uticaj zemlje može se modelovati efektom slike u ogledalu. Zemlja se, dakle, zamenjuje likovima odgovarajućih provodnika, obeleženim sa a' , b' , c' i ZU' postavljenim simetrično u odnosu na originalne pozicije provodnika nad zemljom.



Sl. 8.2 Poprečni presek trofaznog voda sa jednim zaštitnim užetom.

Raspodela povratne struje kroz zemlju odgovaraće putevima sa najmanjom impedansom i kako su zaštitno uže i zemlja u paralelnoj vezi moraju se poznavati impedanse ovih povratnih puteva da bi se ova raspodela mogla da izračuna.

Redne impedanse se sastoje od aktivnih otpornosti i od reaktansi, tako da se opšta matična jednačina za padove napona po dužnom metru nadzemnog voda može predstaviti kao:

$$\underline{U} = \underline{r} + j\omega \underline{l} \underline{I} \quad (8.1)$$

Dakle, u (8.1) sa \underline{U} je označen vektor padova napona (razlika fazora napona pre i iza redne impedanse). U primeru koji se analizira vektori su 8-dimenzioni (tri fazna provodnika i njihovi likovi kao i jedno zaštitno uže i njegov lik). Kako se likovi zaštitnog užeta i provodnika nalaze u zemlji, dakle oni su u paralelnoj vezi, i kako je uobičajeno da se svi likovi ekvivalentiraju jednim provodnikom u zemlji, to je i pad napona na njima isti. Impedanse povratnog provodnika kroz zemlju se standardno kod ekvivalentnih šema prebacuju u deo šeme kojim se modeluju nadzemni provodnici, tako da se formalno dimenzije problema redukuju na 4-dimenzione vektore. Sa takvim pretpostavkama \underline{U} je 4-dimenzioni vektor padova napona u faznim provodnicima i u zaštitnom užetu:

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \\ \underline{U}_{ZU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

U relaciji (8.2) je uvaženo da je zaštitno uže uzemljeno tako da je pad napona na zaštitnom užetu nula ($\underline{U}_{ZU} = 0$). Nadalje je u relaciji (8.1) sa \underline{I} - obeležen 4-dimenzioni vektor struja u faznim provodnicima i u zaštitnom užetu:

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \\ \underline{I}_{ZU} \end{bmatrix}, \quad (8.3)$$

dok je sa:

$$\underline{r} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{ZU} \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

obeležena dijagonalna matrica aktivnih podužnih otpornosti koja za direktan i inverzan redosled odgovara aktivnim otpornostima faznih provodnika, a za nulti redosled je uvećana za trostruku aktivnu otpornost zemlje. Na taj način se postiže da je povratni provodnik kroz zemlju bez impedanse. Matrica \underline{l} je 4-dimenziona matrica podužnih sopstvenih (obeleženih sa indeksom s i oznakom faze) i međusobnih (obeleženih indeksom m) induktivnosti:

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_{sa} & l_{mab} & l_{mac} & l_{maZ} \\ l_{mab} & l_{sb} & l_{mbc} & l_{mbZ} \\ l_{mac} & l_{mbc} & l_{sc} & l_{mcZ} \\ l_{maZ} & l_{mbZ} & l_{mcZ} & l_{sZ} \end{bmatrix} \quad (8.5)$$

Analogno relaciji (8.1) može se formirati i relacija za vezu fluksnih obuhvata i (efektivnih vrednosti) struja po jedinici dužine nadzemnog voda:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_Z \end{bmatrix} = \mathbf{l} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_Z \end{bmatrix} \quad (8.6)$$

U relaciji (8.5) l_{sa} , l_{sb} i l_{sc} su sopstvene podužne induktivnosti faza a , b i c , odnosno induktivnosti petlje *fazni provodnik-zemlja*. Imajući u vidu sl. 8.2 očigledno je da su ove induktivnosti identične, pa se indeks faze može izostaviti, na osnovu čega je, prema (2.72):

$$l_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{h}{r_e}\right) \quad (8.7)$$

U (8.7) sa h je obeležena dubina ekvivalentnog povratnog provodnika u zemlji. Ova dubina se procenjuje prema Carson-ovoj formuli:

$$h = 658,5 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (8.8)$$

Za numeričku vrednost datu u formuli (8.8) h se dobija u m kada se specifična otpornost zemlje ρ smeni u Ωm , a frekvencija naizmenične struje f u Hz.

Tipična vrednost za specifičnu otpornost ρ za prosečno provodnu zemlju je oko $100 \Omega\text{m}$, pa se tako za $f = 50$ Hz, primenom formule (8.8), nalazi da ekvivalentna dubina iznosi $h = 930$ m. Za suhu zemlju specifična otpornost raste tako da ρ iznosi i do $1000 \Omega\text{m}$, pa se u takvim prilikama dobija da je $h = 2945$ m. Nasuprot ovome, za morsku vodu je specifična otpornost vrlo mala, $\rho = (0,01 \div 1) \Omega\text{m}$ tako da je tada ekvivalentna dubina vrlo mala i iznosi $h = 10$ m. Uopšteno, tipične vrednosti za ekvivalentnu dubinu povratne struje kroz zemlju za većinu naših dalekovoda su od 600 do 1000 m.

Na osnovu prethodnog pristupa jasno je da se zemlja, kao geološki provodnik, zamenjuje sa ekvivalentnim provodnikom koji je odgovarajućih dimenzija i nalazi se na dubini h .

Za pretpostavljenu geometriju, a usled simetrije nadzemnog voda, sa sl. 8.2 sledeće međusobne induktivnosti su jednake: $l_{ab} = l_{bc} = l_{ba} = l_{cb} = l_{m1}$. Međutim, međusobna induktivnost između faza a i c razlikuje se od prethodnih (zbog zadate geometrije na sl.8.2): $l_{ac} = l_{ca} = l_{m2} \neq l_{m1}$, pa je:

$$l_{ab} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{ab}'}{D_{ab}}\right) \quad (8.9)$$

Formula (8.9) je dobijena primenom formule za izračunavanje fluksnog obuhvata oko provodnika a usled struje u provodniku b . To je fizički međusobna induktivnost dveju kontura: prve, *fazni provodnik a – povratni provodnik u zemlji* i druge, ~~*fazni provodnik b – povratni provodnik u zemlji*~~. Nadalje, l_{sZ} predstavlja sopstvenu induktivnost petlje *zaštitno uže – povratni provodnik u zemlji*:

$$l_{sZ} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{h}{r_{eZ}}\right) \quad (8.10)$$

U (8.10) je sa r_{eZ} obeležen ekvivalentni poluprečnik zaštitnog užeta merodavan za proračun induktivnosti (stvarni fizički poluprečnik korigovan za vrednost unutrašnjeg fluksa).

Međusobne induktivnosti *fazni provodnici - zaštitno uže* su:

$$l_{maZ} = l_{mcZ} = l_{mZ1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{h}{D_{aZ}}\right) \quad , \quad l_{mbZ} = l_{mZ2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{h}{D_{bZ}}\right) \quad (8.11)$$

Ovde je ponovo uvažena simetrija koju uslovljava dispozicija sa sl. 8.2. Sada se jednačina (8.6) može pisati kao:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & l_{m1} & l_{m2} & l_{mZ1} \\ l_{m1} & l_s & l_{m1} & l_{mZ2} \\ l_{m2} & l_{m1} & l_s & l_{mZ1} \\ l_{mZ1} & l_{mZ2} & l_{mZ1} & l_{sZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_Z \end{bmatrix} \quad (8.12)$$

Matrična jednačina (8.12) može se podeliti na sledeće blokove:

$$\Psi_f = \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix}; \quad I_f = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}; \quad \Psi_Z = \begin{bmatrix} \Psi_{Z1} \\ \Psi_{Z2} \\ \dots \\ \Psi_{Zn} \end{bmatrix}; \quad I_Z = \begin{bmatrix} I_{Z1} \\ I_{Z2} \\ \dots \\ I_{Zn} \end{bmatrix}. \quad (8.13)$$

U (8.13) je pretpostavljen opšti slučaj sa n zaštitnih užadi. Na osnovu (8.13) matrična jednačina (8.12) postaje:

$$\begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{ff} & l_{fZ} \\ l_{fZ}^T & l_{ZZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ I_Z \end{bmatrix} \quad (8.14)$$

Prethodne matrične relacije su potpuno generalne i važe u opštem slučaju za n zaštitnih užadi. Indeks f ukazuje na fazne veličine, a indeks Z na veličine povezane sa zaštitnim užetom (zaštitnom užadi).

Pošto je induktivni pad napona (po jedinici dužine voda):

$$\underline{U} = j\omega \underline{\Psi} \quad (8.15)$$

to se na osnovu (8.14) i (8.15) dobija:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_f \\ \underline{U}_Z \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} l_{ff} & l_{fZ} \\ l_{fZ}^T & l_{ZZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_f \\ \underline{I}_Z \end{bmatrix} \quad (8.16)$$

U relacijama (8.15) i (8.16) radi se sa fazorima. Fizička činjenica da se zaštitno uže uzemljava na svakom stubu dozvoljava da se stavi $\underline{U}_Z = 0$, tako da se primenom tehnike Kron - ove redukcije dobija sledeća veza:

$$\underline{U}_f = j\omega \underline{l}_f \underline{I}_f \quad (8.17)$$

Ovaj prelaz je moguće shvatiti kao eliminisanje struje \underline{I}_Z iz sistema jednačina (8.16). Matrica \underline{l}_f nalazi se jednostavno prema pravilima Kronove redukcije (na način kako je objašnjeno prilikom izračunavanja matrice impedansi metodom *korak po korak*):

$$\underline{l}_f = \underline{l}_{ff} - \underline{l}_{fZ} \underline{l}_{ZZ}^{-1} \underline{l}_{fZ}^T \quad (8.18)$$

U konkretnom analiziranom slučaju ima se:

$$\underline{l}_f = \begin{bmatrix} l'_{s1} & l'_{m1} & l'_{m2} \\ l'_{m1} & l'_{s2} & l'_{m1} \\ l'_{m2} & l'_{m1} & l'_{s1} \end{bmatrix} \quad (8.19)$$

gde je:

$$l'_{s1} = l_s - \frac{l_{mZ1}^2}{l_{sZ}} \quad (8.20)$$

$$l'_{s2} = l_s - \frac{l_{mZ2}^2}{l_{sZ}} \quad (8.21)$$

$$l'_{m1} = l_{m1} - \frac{l_{mZ1}l_{mZ2}}{l_{sZ}} \quad (8.22)$$

$$l'_{m2} = l_{m2} - \frac{l_{mZ1}^2}{l_{sZ}} \quad (8.23)$$

Izračunavanja su osetno pojednostavljena zbog činjenice da je submatrica \mathbf{l}_{ZZ} reda (1×1) , odnosno da se ona u slučaju samo jednog zaštitnog užeta svodi na skalar.

Kao drugi slučaj od interesa može se pretpostaviti slučaj nadzemnog voda sa rasporedom faznih provodnika u temenima jednakostraničnog trougla, sl 8.3. Radi ilustracije povratne struje kroz zemlju u slučaju jednofaznog kratkog spoja na ovom vodu, na slici je prikazan poprečni presek voda. Analogno prethodnoj notaciji sa h je označena efektivna dubina proticanja povratne struje kroz zemlju, koja se meri od težišta trougla, dok je sa D obeleženo međufazno rastojanje, odnosno dužina stranice jednakostraničnog trougla.

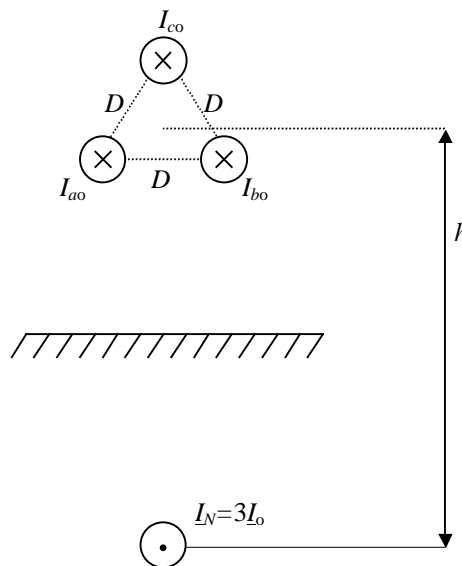
Nulte struje su, kao što je poznato, u slučaju jednofaznog kratkog spoja na vodu sa zemljom u sva tri fazna provodnika jednake.

Kod proračuna direktne induktivnosti potrebno je poznavati srednje geometrijsko rastojanje, D_{SG} , između faznih provodnika, kao i ekvivalentni poluprečnik provodnika, odnosno snopa (ako je reč o konstrukciji faze u vidu snopa).

Kod proračuna nulte induktivnosti važno je uočiti konture, odnosno petlje, koje su merodavne za izračunavanje ukupnog nultog fluksnog obuhvata. Tu konturu za fazu a čine *fazni provodnik* odgovarajuće faze i *povratni provodnik u zemlji*. Analogne dve takve konture mogu se identifikovati i za faze b i c . Sa gledišta nultog fluksnog obuhvata oko provodnika a , važno je uočiti da i nulte struje u fazama b i c doprinose ukupnom fluksu, tako da se primenom formule (2.65), za nalaženje fluksnog obuhvata oko provodnika u grupi sa više paralelnih provodnika, dobija:

$$\Psi_{ao} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{1}{r_e}\right) I_{ao} + \ln\left(\frac{1}{D}\right) I_{bo} + \ln\left(\frac{1}{D}\right) I_{co} - \ln\left(\frac{1}{h}\right) (3I_o) \right] \quad (8.25)$$

Naravno, fluksni obuhvat izvan kruga sa poluprečnikom h je nula, pošto je zbir struja u tri fazna provodnika zajedno sa strujom u povratnom provodniku nula, pa se primenom zakona cirkulacije ova činjenica direktno konstatuje.



Sl. 8.3 Poprečni presek trofaznog voda za vreme trajanja jednofaznog kratkog spoja sa zemljom

Pošto je nulta induktivnost količnik fluksnog obuhvata izračunatog prema (8.25) i nulte struje, to se dobija:

$$l_{ao} = \frac{\Psi_{ao}}{I_{ao}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln\frac{1}{r_e} + \ln\frac{1}{D} + \ln\frac{1}{D} - 3\ln\left(\frac{1}{h}\right) \right] = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{h^3}{r_e D^2}\right) \quad (8.26)$$

U formuli (8.26) je iskorišćena činjenica da su nulte struje u svim fazama jednake. Nulta induktivnost je izračunata za fazu a , ali je ona naravno ista i za preostale dve faze. Iz prethodnih razmatranja se vidi da je nulta induktivnost ustvari kombinacija sopstvene induktivnosti pojedinih faza i međusobnih induktivnosti prema ostalim fazama, što će kasnije biti i formalno matematički pokazano.

Za slučaj kad su fazni provodnici raspoređeni u temenima jednakostraničnog trougla i kada se na vodu nalazi zaštitno uže, ima se pojednostavljenje formula (8.20) i (8.22):

$$l_{m1} = l_{m2} = l_m \quad (8.27)$$

Ako se nadalje pretpostavi da je zaštitno uže simetrično u odnosu na fazne provodnike, tada se dodatno pojednostavljuje:

$$l_{mZ1} = l_{mZ2} = l_{mZ} \quad (8.28)$$

Na osnovu (8.27) i (8.28) relacije (8.20) i (8.22) sada dobijaju sledeći izgled:

$$l'_s = l_s - \frac{l_{mZ}^2}{l_{sZ}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{h}{r_e}\right) - \frac{\left(\ln\left(\frac{h}{D_{SGz}}\right)\right)^2}{\ln\left(\frac{h}{r_{eZ}}\right)} \right] \quad (8.29)$$

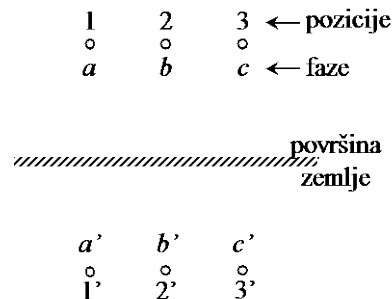
$$l'_m = l_m - \frac{l_{mZ}^2}{l_{sZ}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{h}{D_{SG}}\right) - \frac{\left(\ln\left(\frac{h}{D_{SGz}}\right)\right)^2}{\ln\left(\frac{h}{r_{eZ}}\right)} \right] \quad (8.30)$$

gde je: $D_{SGz} = \sqrt[3]{D_{aZ} D_{bZ} D_{cZ}}$.

Do sada su razmotrena dva slučaja trofaznog voda: prvi sa faznim provodnicima u horizontalnoj ravni sa zaštitnim užetom i drugi, slučaj trofaznog voda sa i bez zaštitnog užeta sa faznim provodnicima u temenima jednakokraničnog trougla.

Od interesa je polazni zadatak nalaženja direktnih, inverznih i nultih podužnih induktivnosti primeniti i na slučaj trofaznog transponovanog voda sa provodnicima u horizontalnoj ravni bez zaštitnog užeta. U slučaju perfektno provodne zemlje ($\rho_Z = 0$) ponovo se može iskoristiti metoda ogledanja, sl. 8.4.

Na sl. 8.4 faze su obeležene sa a , b i c , a pozicije provodnika sa 1, 2 i 3 imajući u vidu i transponovanje faznih provodnika.



Sl. 8.4 Poprečni presek trofaznog voda bez zaštitnog užeta.

Srednji fluksni obuhvat oko faze a po jedinici dužine voda, usled transpozicije, nalazi se kao:

$$\Psi_a = \frac{1}{3} (\Psi_{a1} + \Psi_{a2} + \Psi_{a3}) \quad (8.31)$$

U prethodnoj relaciji Ψ_{ai} predstavlja fluksni obuhvat faze a kada je ona na poziciji i (videti sliku 2.18). Na osnovu prethodno izloženog ima se:

$$\Psi_a = \frac{1}{3} \frac{\mu_0}{2\pi} \left(I_a \ln \frac{D_{11'}}{r_{ea}} + I_b \ln \frac{D_{12'}}{D_{12}} + I_c \ln \frac{D_{13'}}{D_{13}} + I_a \ln \frac{D_{22'}}{r_{ea}} + I_b \ln \frac{D_{23'}}{D_{23}} + I_c \ln \frac{D_{21'}}{D_{21}} + I_a \ln \frac{D_{33'}}{r_{ea}} + I_b \ln \frac{D_{31'}}{D_{31}} + I_c \ln \frac{D_{32'}}{D_{32}} \right) \quad (8.32)$$

Kako za ovaj slučaj važi: $r_{ea} = r_e$; $D_{11'} = D_{22'} = D_{33'} = h$; $D_{21'} = D_{12'}$; $D_{21} = D_{12}$; $D_{13'} = D_{31'}$; $D_{13} = D_{31}$; $D_{32'} = D_{23'}$; $D_{32} = D_{23}$, to se može pisati:

$$\Psi_a = \frac{1}{3} \frac{\mu_0}{2\pi} \left[I_a \ln \left(\frac{h}{r_e} \right)^3 + I_b \ln \left(\frac{D_{12'} D_{23'} D_{31'}}{D_{12} D_{23} D_{31}} \right) + I_c \ln \left(\frac{D_{12'} D_{23'} D_{31'}}{D_{12} D_{23} D_{31}} \right) \right] \quad (8.33)$$

Pošto i za direktne i za inverzne struje važi: $I_a + I_b + I_c = 0$, to se ima:

$$\Psi_a^d = I_a^d \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{h}{r_e} \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12'} D_{23'} D_{31'}}} \right) = I_a^d \ell_d \quad (8.34)$$

Prema tome za $D_{12'} \approx D_{23'} \approx D_{31'} \approx h$ sledi:

$$\ell_d = l_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{SG}}{r_e} \frac{h}{\sqrt[3]{h^3}} \right) \quad (8.35)$$

Na ovaj način je moguće postupiti jer je h reda 1000 m, a rastojanja faznih provodnika do zemlje (visine vešanja) su reda 20 m (obično i manje).

Za nulte struje važi $I_{ao} = I_{bo} = I_{co} = I_o$, tako da se konačno dobija:

$$l_o = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{h^3}{r_e D_{SG}^2} \right) \quad (8.36)$$

Ovo naravno potvrđuje korektnost izvođenja u poglavlju 2.3., kao i korektnost formule (8.26). Korisno je, naravno, ilustrovati primenu formule (8.36) za izračunavanje nulte induktivnosti na primeru konkretnog dalekovoda. Kako je srednje geometrijsko rastojanje između faznih provodnika za geometriju predstavljenu na sl. 8.4 $D = D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} D_{13} D_{23}} = \sqrt[3]{D^3} = D$, i kako su vrednosti za D reda nekoliko metara (približno 1m i nešto više za dalekovode 110 kV, 3 ÷ 4 m za 220 kV dalekovode i oko 10 m za dalekovode 400 kV), to se onda jednostavnom zamenom za 400 kV dalekovode $D \approx 10$ m, $h \approx 1000$ m i $r_e \approx 0,95r$ ($2r \approx 3$ cm) u formulu (8.36) dobija:

$$l_o = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{h^3}{r_e D^2} \right) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{(100000)^3}{1,5 \cdot 1000^2} \right] = 4,52 \cdot 10^{-3} \text{ H/km}$$

Tipične vrednosti nulte podužne reaktanse nadzemnih vodova su prema tome sledeće: $x_o = \omega \cdot l_o = 314 \cdot 4,52 \cdot 10^{-3} = 1,42 \text{ } \Omega/\text{km}$ (Treba psetiti da je tipična vrednost direktne reaktanse $x_d \approx 0,4 \text{ } \Omega/\text{km}$).

Na osnovu prethodne analize zaključuje se da je orijentaciono $x_o = 3,5 x_d$, što se moglo i očekivati jer su konture za izračunavanje nultog fluksa za oko 3 reda veličine veće od kontura merodavnih za izračunavanje direktnog fluksa, a što pod logaritmom znači uvećanu vrednost za oko 3 reda veličine. Dakle, kod tipičnih nadzemnih vodova nulta induktivnost je od 3 do 3,5 puta veća od direktne. Glavni razlog leži u veličini konture koju se ograničava povratni provodnik u zemlji. Važno je istaći činjenicu da nulta induktivnost, odnosno geometrija kontura, zavisi od specifične otpornosti tla. Naime, jasno je prema Carsonovom obrascu da veličinu konture direktno određuje specifična otpornost zemlje, odnosno ekvivalentna dubina povratnog provodnika, h .

Prethodno je pokazano da je nulta induktivnost u osnovi određena povratnim putem struje kroz zemlju. Kako se trostruka nulta struja u praksi ne mora vraćati sva kroz zemlju, već jedan njen deo može da se vraća i kroz zaštitnu užad na dalekovodu (ako ona postoje) to se sagledava da slika postaje znatno složenija. Uprošćeno se može rezonovati da nulta induktivnost varira sa vrstom zaštitnog užeta koje se koristi. Ako je u pitanju vod sa zaštitnim užetom od Al-Fe, tada povratna struja teče kroz nemagnetni materijal (aluminijum) zaštitnog užeta i tada se pojavljuju dva alternativna puta za povratak $3I_o$: jedan je zemlja a drugi je zaštitno uže. U ovakvim situacijama uticaj ekvivalentne konture se smanjuje zbog smanjene struje koja kroz nju teče u principu nulta induktivnost se takođe smanjuje, tipično do vrednosti $x_o \approx 2x_d$ (u situacijama kada nema zaštitnog užeta imalo se $x_o = 3,5x_d$). S druge strane postoje i starija rešenja sa zaštitnim užetom isključivo od čelika. Kako su ove analize od interesa kada se na vodu dešava kratki spoj, odnosno kada kroz takvo uže teku velike struje, to se zaključuje da je tada skin efekat jako izražen, pa sledi da se mali deo struje vraća kroz zaštitno uže od čelika. Stoga se može smatrati kao da zaštitnog užeta i nema u slučajevima kada je ono od čelika (efekat zasićenja gvožđa).

Prethodna analiza se odnosila na jednostruke vodove. Kod dvostrukih vodova induktivna sprega je po pravilu jača i treba pažljivo analizirati formulu za ukupni fluksni obuhvat za slučaj kada je više paralelnih vodova u pitanju. Nulti fluksni obuhvat za slučaj dva paralelna voda (I i II) na istim stubovima (sl. 2.19) iznosi:

$$\begin{aligned} \underline{\Psi}_o = \frac{\mu_o}{2\pi} & \left[\underline{I}_{aol} \ln\left(\frac{l}{r_e}\right) + \underline{I}_{bol} \ln\left(\frac{1}{D_I}\right) + \underline{I}_{col} \ln\left(\frac{1}{D_I}\right) + \right. \\ & \left. + \underline{I}_{aoll} \ln\left(\frac{l}{r_e}\right) + \underline{I}_{boll} \ln\left(\frac{1}{D_{II}}\right) + \underline{I}_{coll} \ln\left(\frac{1}{D_{II}}\right) - (6\underline{I}_o) \ln\left(\frac{1}{h}\right) \right] \end{aligned} \quad (8.37)$$

U (8.37) sa D_I je obeleženo srednje geometrijsko rastojanje trofaznog sistema I , a sa D_{II} analogno za II . Ovde je pretpostavljeno da se jednofazni kratki spoj jednovremeno desio na provodnicima faze a kod oba paralelna trofazna voda, I i II .

Tipično je $x_o = 3x_d$ kod dvostrukih sistema bez zaštitnog užeta. Ako je dvostruki vod na istim stubovima, a sa zaštitnim užetom, tada x_o raste do $5x_d$. Za konkretnu konfiguraciju provodnika nulta induktivnost se može relativno jednostavno meriti.

Ako se sada za simetričan vod kod koga su provodnici raspoređeni u temenima jednakokraničnog trougla i kod koga je $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$, postavite jednačine veza napona i struja (po jedinici dužine voda), tada se ima:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{Z}_s \underline{I}_a + \underline{Z}_m \underline{I}_b + \underline{Z}_m \underline{I}_c = \underline{Z}_s \underline{I}_a + \underline{Z}_m (\underline{I}_b + \underline{I}_c) \\ \underline{U}_b &= \underline{Z}_m \underline{I}_a + \underline{Z}_s \underline{I}_b + \underline{Z}_m \underline{I}_c = \underline{Z}_s \underline{I}_b + \underline{Z}_m (\underline{I}_a + \underline{I}_c) \\ \underline{U}_c &= \underline{Z}_m \underline{I}_a + \underline{Z}_m \underline{I}_b + \underline{Z}_s \underline{I}_c = \underline{Z}_s \underline{I}_c + \underline{Z}_m (\underline{I}_a + \underline{I}_b) \end{aligned} \quad (8.38)$$

Ako se proučavaju samo efekti magnetnog kola, onda je:

$$\underline{Z}_s = j\omega l_s, \quad \underline{Z}_m = j\omega l_m, \quad (8.39)$$

na osnovu čega se dobija:

$$\underline{U}_a = j\omega(l_s - l_m)\underline{I}_a = j\omega l \underline{I}_a \quad (8.40)$$

Analogne jednačine se imaju za faze b i c . Sa l je obeležena već uvedena *pogonska* induktivnost kojom se magnetno spregnuta trofazna kola simetrično opterećena tretiraju na monofaznim šemama, (a uz respektovanje njihove međusobne magnetne sprege preko ove induktivnosti).

8.2. Generalizacija izraza za redne impedanse direktnog, inverznog i nultog redosleda za nadzemne vodove

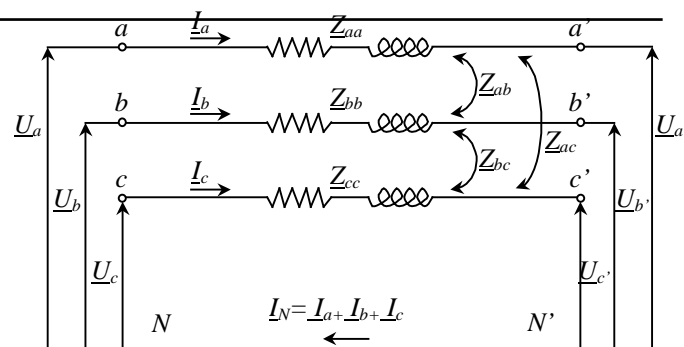
Na sl. 8.5 prikazana je trofazna šema u smislu teorije kola za nadzemni vod bez transpozicije faznih provodnika, kod koga su u opštem slučaju sopstvene i međusobne impedanse nejednake.

Za šemu na sl. 8.5 osnovna naponska jednačina (u impedantnom obliku) je:

$$\underline{U}_{a,b,c} = \underline{Z}_{a,b,c} \underline{I}_{a,b,c} \quad (8.41)$$

gde je:

$$\underline{Z}_{a,b,c} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{aa} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ac} \\ \underline{Z}_{ba} & \underline{Z}_{bb} & \underline{Z}_{bc} \\ \underline{Z}_{ca} & \underline{Z}_{cb} & \underline{Z}_{cc} \end{bmatrix} \quad (8.42)$$



Sl. 8.5 Trofazna šema nesimetričnog (netransponovanog) nadzemnog voda.

Dakle, sa $\underline{Z}_{a,b,c}$ je obeležena matrica sopstvenih i međusobnih impedansi u koordinatama faznih veličina, odnosno impedansi pridruženih fazama a , b i c . U (8.42) i sopstvene i međusobne impedanse (koje odlikavaju elektromagnetnu i

elektrostatičku spregu faza) su međusobno nejednake: $Z_{aa} \neq Z_{bb} \neq Z_{cc}$, odnosno $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$. Matricu kolonu napona $\underline{U}_{a,b,c}$ treba shvatiti kao matricu kolonu padova napona počev od krajeva a, b i c pa do krajeva a', b' i c' . Zbog jednostavnosti pisanja, oznake za padove napona su izostavljene.

Ako se sada, u cilju prelaska u koordinate simetričnih komponenti, matrice kolone faznih napona i struja prevedu u matrice kolone napona i struja simetričnih komponenti, ima se:

$$\underline{F} \underline{U}_{d,i,o} = \underline{Z}_{a,b,c} \underline{F} \underline{I}_{d,i,o} \quad (8.43)$$

Posle množenja izraza (8.43) sa leve strane sa \underline{F}^{-1} dobija se:

$$\underline{U}_{d,i,o} = \underline{F}^{-1} \underline{Z}_{a,b,c} \underline{F} \underline{I}_{d,i,o} = \underline{Z}_{d,i,o} \underline{I}_{d,i,o} \quad (8.44)$$

Iz relacije (8.44) vidi se da je:

$$\underline{Z}_{d,i,o} = \underline{F}^{-1} \underline{Z}_{a,b,c} \underline{F} \quad (8.44)$$

$$\text{gde su: } \underline{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{i} \quad \underline{F}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Zbog podsećanja \underline{F} je matrica Fortescue-ove transformacije, a \underline{F}^{-1} je inverzna matrica Fortescue-ove transformacije.

U (8.44) je definisana matrica sopstvenih i međusobnih impedansi u koordinatama simetričnih komponenti, koja se može pisati kao:

$$\underline{Z}_{d,i,o} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{dd} & \underline{Z}_{di} & \underline{Z}_{do} \\ \underline{Z}_{id} & \underline{Z}_{ii} & \underline{Z}_{io} \\ \underline{Z}_{od} & \underline{Z}_{oi} & \underline{Z}_{oo} \end{bmatrix} \quad (8.45)$$

ili kao:

$$\underline{Z}_{d,i,o} = \begin{bmatrix} (\underline{Z}_{os} - \underline{Z}_{om}) & (\underline{Z}_{is} + 2\underline{Z}_{im}) & (\underline{Z}_{ds} - \underline{Z}_{dm}) \\ (\underline{Z}_{ds} + 2\underline{Z}_{dm}) & (\underline{Z}_{os} - \underline{Z}_{om}) & (\underline{Z}_{is} - \underline{Z}_{im}) \\ (\underline{Z}_{is} - \underline{Z}_{im}) & (\underline{Z}_{ds} - \underline{Z}_{dm}) & (\underline{Z}_{os} + 2\underline{Z}_{om}) \end{bmatrix} \quad (8.46)$$

gde su po definiciji:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{os} &= \frac{1}{3}(\underline{Z}_{aa} + \underline{Z}_{bb} + \underline{Z}_{cc}) & \underline{Z}_{om} &= \frac{1}{3}(\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}) \\ \underline{Z}_{ds} &= \frac{1}{3}(\underline{Z}_{aa} + \underline{a}\underline{Z}_{bb} + \underline{a}^2\underline{Z}_{cc}) & \underline{Z}_{dm} &= \frac{1}{3}(\underline{a}^2\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{a}\underline{Z}_{ca}) \\ \underline{Z}_{is} &= \frac{1}{3}(\underline{Z}_{aa} + \underline{a}^2\underline{Z}_{bb} + \underline{a}\underline{Z}_{cc}) & \underline{Z}_{im} &= \frac{1}{3}(\underline{a}\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{a}^2\underline{Z}_{ca}) \end{aligned} \quad (8.47)$$

gde je: $\underline{a} = e^{j2\pi/3} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$.

Treba ukazati da matrica $\underline{Z}_{d,i,o}$ u (8.46) nije simetrična i njena dalja primena ne vodi ka dekoplovanju direktnog, inverznog i nultog komponentnog sistema. Prema tome ovo nije željeni rezultat i zato se prelazi na slučaj transponovanog voda. Naravno, u pasivnim mrežama važi: $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{ba}$, $\underline{Z}_{ac} = \underline{Z}_{ca}$, itd. Rešenje koje vodi dekoplovanju (rasprezanju) svodi se ili na postavljanje provodnika simetrično jedan u odnosu na drugi ili na transponovanje faznih provodnika, sl. 8.6. Ako je jedan od prethodnih uslova zadovoljen tada se ima:

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_m \quad (8.48a)$$

odnosno

$$\underline{Z}_{aa} = \underline{Z}_{bb} = \underline{Z}_{cc} = \underline{Z}_s \quad (8.48b)$$

Dakle, sada je:

$$\underline{Z}_{a,b,c} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{bmatrix} \quad (8.49)$$

gde je:

$$\underline{Z}_s = \left(r + r_z + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{r_e} \right) \quad (8.50)$$

$$\underline{Z}_m = \left(r_z + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{D_{SG}} \right) \quad (8.51)$$

Važno je napomenuti da se faktor 3 uz r_z javlja tek u pogonskoj nultoj impedansi, dok ga u sopstvenoj nema. Sve oznake su već prethodno uvedene. Ako se sad primeni prethodno objašnjena procedura prelaska u koordinate simetričnih komponenti, tada se dobija :

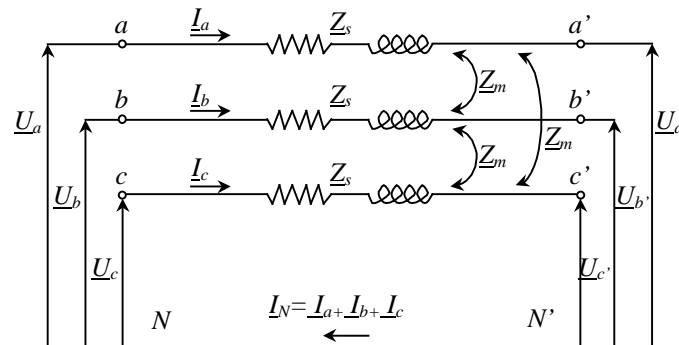
$$\underline{Z}_{d,i,o} = \begin{bmatrix} (\underline{Z}_s - \underline{Z}_m) & 0 & 0 \\ 0 & (\underline{Z}_s - \underline{Z}_m) & 0 \\ 0 & 0 & (\underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_d & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_i & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_o \end{bmatrix} \quad (8.52.)$$

gde je:

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m = r + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{SG}}{r_e} \quad (8.53)$$

$$\underline{Z}_o = \underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m = r + 3r_z + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h^3}{r_e D_{SG}^2} \quad (8.54)$$

Iz (8.52) se vidi da je dekoplovanje ostvareno i da se proračuni u ovakvim situacijama vrše po tri nezavisna komponentna sistema d, i i o . Očividno je da je u (8.53) \underline{Z}_d , odnosno \underline{Z}_i , jednako već uvedenoj i definisanoj pogonskoj impedansi.



SI. 8.6 Trofazna šema simetričnog nadzemnog voda.

Iz prethodnih razmatranja je jasno da su vandijagonalni elementi matrice $\underline{Z}_{d,i,o}$ u slučaju nesimetričnog voda osetno manji od elemenata na glavnoj dijagonali. Kvantitativna mera nesimetrije uvodi se kroz faktore nesimetrije:

$$m_o = -\frac{Z_{od}}{Z_{oo}} \quad m_i = \frac{Z_{id}}{Z_{ii}} \quad (8.55)$$

Tipične vrednosti ovih faktora za realne dalekovode iznose negde oko 0,02 (a što znači postojanje relativno male nesimetrije do 2%).

Nulta aktivna otpornost u monofaznim šemama kod kojih je povratni provodnik bez impedanse (fiktivni provodnik), izračunava se, saglasno (8.54), kao $r_o = r + 3r_z$, gde je:

$$r - \text{aktivna podužna otpornost direktnog redosleda, } r = \rho \frac{1 \text{ km}}{s} \text{ } \Omega/\text{km}$$

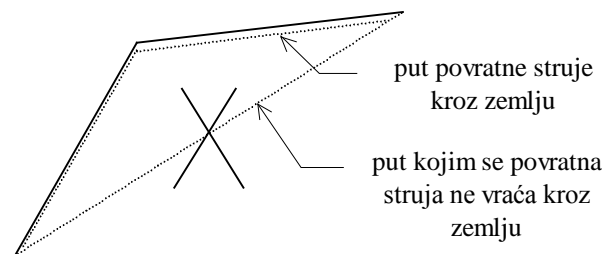
r_z - aktivna podužna otpornost zemlje, $r_z = \pi^2 f \cdot 10^{-4}$ (Ω/km) što za $f = 50$ Hz, daje $r_z = 0,05$ (Ω/km). Objašnjenje za faktor 3 kod aktivne podužne otpornosti zemlje svodi se na činjenicu da kroz zemlju teče trostruka nulta struja, tako da je u pogledu padova napona u monofaznim nultim šemama sve isto ako se radi sa $r_z(3I_o)$ ili $(3r_z)I_o$. Ovaj zaključak je opšti i ne odnosi se samo na

aktivnu podužnu otpornost zemlje. Iz tog se razloga sve impedanse povratnog puta (uključujući i otpornost uzemljenja) mogu prebaciti u fazni provodnik, kod modelovanja trofaznih kola sa povratnim putem kroz zemlju sa monofaznom (nultom) šemom, tako da se pomnože sa faktorom 3. Time se dobije fiktivni nulti povratni provodnik u kojem nema padova napona. Treba ukazati da je u praksi $3r_z > r$.

Iz izraza za podužnu aktivnu otpornost zemlje (shvaćene kao povratni provodnik) se vidi da ona ne zavisi od specifične otpornosti zemlje, već isključivo od frekvencije. Dubina na kojoj se nalazi povratni ekvivalentni provodnik i aktivna otpornost tog provodnika su međusobno zavisne kroz činjenicu da naizmenična struja koja teče kroz petlju *fazni provodnik – zemlja* teži da se zatvori kroz petlju sa najmanjom impedansom. Pri niskim frekvencijama (50 Hz) udeo aktivne otpornosti u impedansi petlje je uticajan i zato struja teče kroz veliki poprečni presek tla, što za rezultat daje malu aktivnu otpornost povratnog provodnika. Pri visokim frekvencijama dominira reaktansa u impedansi petlje i iz tih razloga petlja mora biti što manja. Pri visokim frekvencijama dakle ima se kao da povratna struja teče po graničnoj površini zemlje (tanak film na površini zemlje zbog potrebe da se induktivnost svede na minimum). Naravno, u ovakvim okolnostima povratna struja teče kroz mali poprečni presek zemlje i aktivna otpornost zemlje na visokim frekvencijama raste. Time je jasno objašnjeno da je aktivna otpornost zemlje (linearno) zavisna od frekvencije.

S druge strane, ako se ρ_z menja duž povratnog provodnika to se i dalje količnik $\frac{\rho_z}{s} = r_z$, ne menja, a ovaj količnik je jedino merodavan za iznos aktivne podužne otpornosti zemlje. Ovo se može dodatno pojasniti kao da se ima povratni provodnik fleksibilnog poprečnog preseka, s . Ovaj fleksibilni provodnik se ponaša tako da se prilagođava veličini specifične otpornosti zemlje, ρ_z , i to na način da kada se naiđe na malo ρ_z onda je i s malo i obrnuto.

U cilju šire ilustracije postizanja minimalne impedanse povratne struje na sl. 8.7 je prikazan karakterističan lom trase nadzemnog voda a isprekidanom linijom putanja povratne struje kroz zemlju.



Sl. 8.7 Ilustracija loma trase i povratnog puta struja kroz zemlju

Sa sl. 8.7 je očevidno da se povratna struja vraća putem kojim se ostvaruju geometrijski najmanje konture.

8.3. Generalizacija izraza za otočne admitanse direktnog, inverznog i nultog redosleda za nadzemne vodove

U osnovi se, kad je reč o otočnoj grani u ekvivalentnoj π -šemi nadzemnog voda, radi o susceptansama, jer su konduktanse kod tih šema po pravilu zanemarljive u odnosu na susceptanse. Treba istaći da se kod proračuna kapacitivnosti c nadzemnih vodova (tj. susceptanse $b = j\omega c$), može iskoristiti dualna teorija koja povezuje magnetno i električno polje.

Ako se za vod na sl. 8.3 pretpostavi da se nalazi u simetričnom radnom stanju, tada se veza napona (razlika potencijala) i naelektrisanja provodnika može u matrično - vektorskoj notaciji predstaviti na sledeći način:

$$\underline{U}_{a,b,c} = \alpha \mathbf{q} \quad (8.56)$$

U (8.56) uvedena je matrica potencijalnih koeficijenata označena sa α .

Koristeći dualni pristup, analogno jednačini (8.31), može se za transponovani vod (naponi su dualni fluksnim obuhvatima, a naelektrisanja strujama) napisati sledeća veza:

$$\underline{U}_a = (\underline{V}_a - \underline{V}_N) = \frac{1}{3} (\underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a3}) \quad (8.57)$$

Sa \underline{U}_a je obeležena srednja vrednost napona faze a koja duž trase dalekovoda zauzima pozicije 1, 2 i 3 respektivno (videti sliku transpozicije, sl. 2.18), tako da je \underline{U}_{a1} napon faze a kada je ova faza na poziciji 1 itd., a sa V_a i V_N su obeleženi potencijali provodnika a i neutralnog provodnika, respektivno (V_N je za simetričan režim jednako nuli).

Ako se sada svaki od provodnika zameni sa podužnim naelektrisanjem, skoncentrisanim u centru provodnika, tada se ima:

$$\underline{U}_a = \frac{1}{3} \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left(q_a \ln\left(\frac{h}{r}\right)^3 + q_b \ln\left(\frac{D_{12'} D_{23'} D_{31'}}{D_{12} D_{23} D_{31}}\right) + q_c \ln\left(\frac{D_{12'} D_{23'} D_{31'}}{D_{12} D_{23} D_{31}}\right) \right) \quad (8.58)$$

U (8.58) direktno su zamenjene vrednosti za potencijalne koeficijente u slučaju transponovanog voda. Kod izvođenja ove relacije od pomoći je i formula (2.89).

Kako i za direktni i za inverzni redosled u simetričnim režimima važi:

$$q_a + q_b + q_c = 0 \quad (8.59)$$

to se uvođenjem simetričnih komponenti u (8.58) jednostavno za direktni i inverzni redosled dobija:

$$U_d = \frac{1}{c_d} q_d = U_i \quad (8.60)$$

odnosno:

$$c_d = c_i = \frac{2\pi\epsilon_o}{\ln\left(\frac{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}}{r} \frac{h}{\sqrt[3]{D_{12'}D_{23'}D_{31'}}}\right)} \approx \frac{2\pi\epsilon_o}{\ln\left(\frac{D_{SG}}{r} \frac{h}{\sqrt[3]{h^3}}\right)} = \frac{2\pi\epsilon_o}{\ln\left(\frac{D_{SG}}{r}\right)} \quad (8.61)$$

Pošto za nulti redosled važi:

$$q_a = q_b = q_c = q_o \quad (8.62)$$

to se prema (8.58) lako nalazi:

$$c_o = \frac{2\pi\epsilon_o}{\ln\left(\frac{h}{r} \frac{\sqrt[3]{(D_{12'}D_{23'}D_{31'})^2}}{D_{SG}^2}\right)} \approx \frac{2\pi\epsilon_o}{\ln\left(\frac{h}{r} \frac{h^2}{D_{SG}^2}\right)} = \frac{2\pi\epsilon_o}{\ln\left(\frac{h^3}{rD_{SG}^2}\right)} \quad (8.63)$$

Za slučaj netransponovanog voda saglasno dualnom pristupu, ima se sledeća veza (analogna jednačinama koje opisuju magnetno polje):

$$U_a = q_a \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{h}{r} + q_b \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{D_{12'}}{D_{12}} + q_c \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{D_{13'}}{D_{13}} \quad (8.64)$$

odnosno:

$$U_a = q_a \alpha_{aa} + q_b \alpha_{ab} + q_c \alpha_{ac} \quad (8.65)$$

Jednačine analogne jednačini (8.65) se mogu napisati i za faze *b* i *c*, tako da se za trofazni sistem dobija sledeća matična veza:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{aa} & \alpha_{ab} & \alpha_{ac} \\ \alpha_{ba} & \alpha_{bb} & \alpha_{bc} \\ \alpha_{ca} & \alpha_{cb} & \alpha_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} \quad (8.66)$$

Ako se slučaj pretpostavljenog netransponovanog voda primeni na primer voda kod koga su faze postavljene u horizontalnoj ravni (faza *b* je srednja faza), to se usled simetrije ima:

$$\alpha_{ab} = \alpha_{ba} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = \alpha_{m1} \quad (8.67)$$

Za horizontalan raspored provodnika isto tako važi:

$$\alpha_{aa} = \alpha_{cc} = \alpha_{s1} \quad \alpha_{bb} = \alpha_{s2} \quad (8.68)$$

$$\alpha_{ac} = \alpha_{ca} = \alpha_{m2} \quad (8.69)$$

Matrica sopstvenih i međusobnih kapacitivnosti u ovom posebnom slučaju je prema tome sledećeg izgleda:

$$\mathbf{c}_{a,b,c} = \begin{bmatrix} c_{s1} & c_{m1} & c_{m2} \\ c_{m1} & c_{s2} & c_{m1} \\ c_{m2} & c_{m1} & c_{s1} \end{bmatrix} \quad (8.70)$$

Ova matrica je po definiciji jednaka:

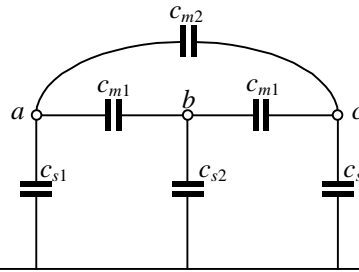
$$\mathbf{c}_{a,b,c} = \mathbf{a}_{a,b,c}^{-1} \quad (8.71)$$

Prelazeći u koordinate simetričnih komponenti dobija se:

$$\mathbf{c}_{d,i,o} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{c}_{a,b,c} \mathbf{F} \quad (8.72)$$

gde su \mathbf{F}^{-1} i \mathbf{F} ranije definisane matrice. Izračunavanjem desne strane u (8.72) konačno se dobija:

$$\mathbf{c}_{d,i,o} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2c_{s1} + c_{s2} - 2c_{m1} - c_{m2} & \underline{a}^2(c_{s2} - c_{s1} + 2c_{m2} - 2c_{m1}) & \underline{a}(c_{s2} - c_{s1} + c_{m1} - c_{m2}) \\ \underline{a}(c_{s2} - c_{s1} + 2c_{m2} - 2c_{m1}) & 2c_{s1} + c_{s2} - 2c_{m1} - c_{m2} & \underline{a}^2(c_{s2} - c_{s1} + c_{m1} - c_{m2}) \\ \underline{a}^2(c_{s2} - c_{s1} + c_{m1} - c_{m2}) & \underline{a}(c_{s2} - c_{s1} + c_{m1} - c_{m2}) & 2c_{s1} + c_{s2} + 4c_{m1} + 2c_{m2} \end{bmatrix} \quad (8.73)$$



Sl. 8.8 Sopstvene i međusobne kapacitivnosti trofaznog voda.

Na osnovu (8.73) se sada ima:

$$c_d = c_i = \frac{1}{3}(2c_{s1} + c_{s2} - 2c_{m1} - c_{m2}) \quad (8.74)$$

$$c_o = \frac{1}{3}(2c_{s1} + c_{s2} + 4c_{m1} + 2c_{m2}) \quad (8.75)$$

Ako se vod učini simetričnim (transpozicijom ili rasporedom provodnika) tada se sprezanje između direktnog, inverznog i nultog sistema gubi, tako da se dobija:

$$\mathbf{c}_{d,i,o} = \begin{bmatrix} c_d & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & c_o \end{bmatrix} \quad (8.76)$$

Prethodni stav se lako potvrđuje izračunavanjem matrice potencijalnih koeficijenata za simetričan vod, u koordinatama simetričnih komponenti:

$$\begin{aligned} \alpha_{d,i,o} &= \mathbf{F}^{-1} \mathbf{a}_{a,b,c} \mathbf{F} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_s & \alpha_m & \alpha_m \\ \alpha_m & \alpha_s & \alpha_m \\ \alpha_m & \alpha_m & \alpha_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \alpha_s - \alpha_m & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_s - \alpha_m & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_s + 2\alpha_m \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8.77)$$

odakle se direktno nalazi:

$$\mathbf{a}_{d,i,o} = \begin{bmatrix} \alpha_d & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_o \end{bmatrix} \quad (8.78)$$

U (8.78) postignuto je potpuno raspzezanje.

Ako se u izrazima (8.74) i (8.75) pretpostavi idealna simetrija (ili transponovan vod), tada je naravno: $c_{s1} = c_{s2}$ i $c_{m1} = c_{m2}$, što dalje direktno daje:

$$c_d = \frac{1}{3}[3c_s - 3c_m] = c_s - c_m \quad (8.79)$$

odnosno:

$$c_o = \frac{1}{3}[3c_s + 6c_m] = c_s + 2c_m \quad (8.80)$$

Na sl. 8.8 je prikazan poprečni presek trofaznog voda za koji je pretpostavljeno da sve tri faze imaju identične kapacitivnosti faznih provodnika prema zemlji, koje su istovremeno i nulte kapacitivnosti. Zbog rasporeda provodnika na temenima jednakostraničnog trougla i međusobne kapacitivnosti c_{medj} su jednake. Za simetričan trofazni sistem napona koji deluje na fazne provodnike moguće je trougao sa međusobnim kapacitivnostima transfigurisati u zvezdu, sl. 8.8. Međusobne kapacitivnosti c_{med} i nulte (dozemne) kapacitivnosti c_o nazivaju se parcijalnim kapacitivnostima i iz njih je moguće izračunati pogonsku kapacitivnost c samo u slučaju kad je vod simetričan (tada je potencijal neutralne tačke jednak potencijalu zemlje). U tom slučaju se kapacitivnost prema zemlji i trostruka međusobna kapacitivnost sabiru i tako se ostvaruje potpuno raspzezanje faznih provodnika. Dakle, za simetrična radna stanja vod se može na monofaznim šemama modelovati sa podužnom pogonskom kapacitivnošću (sa aspekta električnog polja):

$$c = c_o + 3c_{med} \quad (8.81)$$

Parcijalne kapacitivnosti c_o i c_{med} imaju pun fizički smisao i za tipične nadzemne vodove iznose:

$$c_o \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}$$

$$c_{med} \approx 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}$$

tako da se za pogonsku kapacitivnost tipično dobija:

$$c \approx 9 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}$$

Prethodne analize podužnih kapacitivnosti nisu uključile opšti slučaj nadzemnog voda sa zaštitnom užadi. Iz tih razloga ponovo se polazi od razmatranja poprečnog preseka trofaznog nadzemnog voda sa jednim zaštitnim užetom, sl. 8.2 (uopštenje na veći broj zaštitne užadi i na proizvoljnu geometriju se veoma jednostavno radi). Po analogiji sa relacijom (8.6), koja se odnosi na magnetna polja, moguće je napisati sledeću relaciju za električna polja, proširenje relacije (8.66) na slučaj sa zaštitnim užetom:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{aa} & \alpha_{ab} & \alpha_{ac} & \alpha_{az} \\ \alpha_{ba} & \alpha_{bb} & \alpha_{bc} & \alpha_{bz} \\ \alpha_{ca} & \alpha_{cb} & \alpha_{cc} & \alpha_{cz} \\ \alpha_{za} & \alpha_{zb} & \alpha_{zc} & \alpha_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \\ q_z \end{bmatrix} \quad (8.82)$$

Matrica potencijalnih koeficijenata u (8.82) je simetrična u odnosu na glavnu dijagonalu tako da npr. važi: $\alpha_{az} = \alpha_{za}$ i $\alpha_{ac} = \alpha_{ca}$. Pošto je zaštitno uže uzemljeno u (8.82) je pretpostavljeno da je $U_z=0$.

Rešavanjem matrice relacije (8.82) po podužnim naelektrisanjima prelazi se sa matrice potencijalnih koeficijenata (sopstvenih i međusobnih) na matricu sopstvenih i međusobnih kapacitivnosti (pretpostavlja se geometrija sa sl. 8.2 i jednakost sopstvenih kapacitivnosti):

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \\ q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_s & c_{m1} & c_{m2} & x \\ c_{m1} & c_s & c_{m1} & x \\ c_{m2} & c_{m1} & c_s & x \\ x & x & x & x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.83)$$

Elementi matrice kapacitivnosti u (8.83) označeni sa x nisu od interesa jer je napon zaštitnog užeta jednak nuli. Zato bi se matrica kapacitivnosti postupkom Kronove redukcije mogla svesti na simetričnu, kvadratnu matricu dimenzija (3x3) analogno formuli (8.18). Međutim, pokazuje se da je pogodnije postupak Kronove redukcije primeniti na matricu vezu (8.82). Pri tome se dodatno pretpostavlja da je vod transponovan i da je u elektrostatičkom smislu simetričan tako da se metoda simetričnih komponenti može uspešno iskoristiti. U tom slučaju sopstveni i međusobni potencijalni koeficijenti (za transponovanu konfiguraciju sa sl. (8.2) a imajući u vidu relacije (2.80) i (2.74), kao i sl. 2.23 su:

$$\alpha_s = \alpha_{aa} = \alpha_{bb} = \alpha_{cc} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{2\sqrt[3]{h_a h_b h_c}}{r} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{2h_{SG}}{r} \quad (8.84.a)$$

$$\alpha_m = \alpha_{ab} = \alpha_{bc} = \alpha_{cb} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{\sqrt[3]{D'_{ab} D'_{ac} D'_{bc}}}{\sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{cb}}} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{D'_{SG}}{D_{SG}} \quad (8.84.b)$$

$$\alpha_{sz} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{2h_z}{r_z} \quad (8.84.c)$$

$$\alpha_{mz} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{\sqrt[3]{D'_{az} D'_{bz} D'_{cz}}}{\sqrt[3]{D_{az} D_{bz} D_{cz}}} = 18 \cdot 10^6 \ln \frac{D'_{SGz}}{D_{SGz}} \quad (8.84.d)$$

Posle primene Kronove redukcije na (8.82) dobija se:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha'_s & \alpha'_m & \alpha'_m \\ \alpha'_m & \alpha'_s & \alpha'_m \\ \alpha'_m & \alpha'_m & \alpha'_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} \quad (8.85)$$

Relacija (8.85) važi kako za efektivne vrednosti napona i naelektrisanja tako i za odgovarajuće fazore. U (8.85) se ima:

$$\alpha'_s = \alpha_s - \frac{\alpha_{mz}^2}{\alpha_{sz}} \quad (8.86.a)$$

$$\alpha'_m = \alpha_m - \frac{\alpha_{mz}^2}{\alpha_{sz}} \quad (8.87.b)$$

Ako se u (8.85) reši po naelektrisanjima tada se dobija:

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c'_s & c'_m & c'_m \\ c'_m & c'_s & c'_m \\ c'_m & c'_m & c'_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (8.87)$$

U (8.87) se ima:

$$e'_s = \frac{\alpha'_s + \alpha'_m}{(\alpha'_s + 2\alpha'_m)(\alpha'_s - \alpha'_m)} \quad (8.88.a)$$

$$e'_m = \frac{-\alpha'_m}{(\alpha'_s + 2\alpha'_m)(\alpha'_s - \alpha'_m)} \quad (8.88.b)$$

Međusobna kapacitivnost c'_m je matematička predstava pošto je negativna. Ponovo se lako pokazuje da je slično kao u (8.79) i (8.80):

$$c_d = c'_s - c'_m = \frac{1}{\alpha'_s - \alpha'_m} = c \quad (8.89)$$

$$c_o = c'_s + 2c'_m = \frac{1}{\alpha'_s + 2\alpha'_m} = c \quad (8.90)$$

Zamenom relacija (8.84) u (8.86) lako se izračunava pogonska kapacitivnost c (izraz 8.61) i nulta kapacitivnost c_o za slučaj bez zaštitnog užeta, formula (8.63).

Za slučaj sa zaštitnim užetom nalazi se:

$$c_o = \frac{2\pi\varepsilon_o}{\ln\left(\frac{2h_{SG}}{r} \cdot \frac{(D'_{SG})^2}{D_{SG}^2}\right) - 3\left(\ln^2\left(\frac{D'_{SGz}}{D_{SGz}}\right) / \ln\left(\frac{2h_z}{r_z}\right)\right)} \quad (8.91)$$

I na kraju, pošto je prema (8.81)

$$c_{med} = \frac{c - c_o}{3} = \frac{(c'_s - c'_m) - (c'_s + 2c'_m)}{3} = -c'_m \quad (8.92)$$

to onda i relacija (8.92) pokazuje da je c'_m (odnosno c_m) matematički uvedena veličine, a da c_{med} ima svoju fizičku interpretaciju.

9. Modelovanje transformatora za potrebe proračuna struja kratkih spojeva

Transformator je statički element u EES-u pa je iz tog razloga njegova direktna (pogonska) reaktansa jednaka inverznoj, $X_d = X_i$. Za energetske transformatore, posebno one velikih snaga, aktivne otpornosti su objektivno od manjeg značaja za naredne analize, pa neće biti posebno ni pominjane.

9.1. Uticaj vrste magnetnog kola na nulte šeme transformatora

Nulte ekvivalentne šeme transformatora su nesporno komplikovane, jer zavise od vrste magnetnog kola, od načina uzemljenja zvezdišta kao i od sprege transformatora. U narednom izlaganju ovi uticaji biće posebno obrađeni.

Uticaj magnetnog kola na nulte reaktanse sagledava se preko analize različitih tipova magnetnog kola. Principijelno su dva tipa magnetnih kola od interesa:

I) Magnetna kola sa povratnim putem za nulti fluks sa velikom magnetnom otpornošću (trostubno magnetno kolo za trofazne transformatore, poznato kao *evropski* tip transformatora)

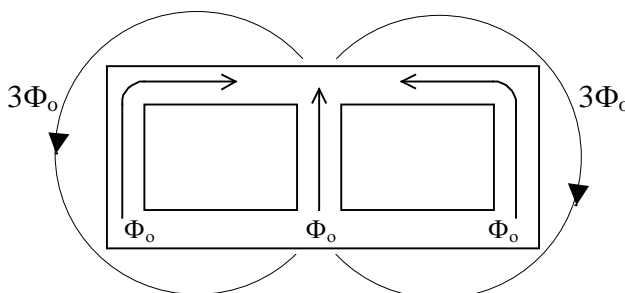
II) Magnetna kola sa povratnim putem za nulti fluks sa malom magnetnom otpornošću (kroz gvožđe). Ovde se mogu uočiti dve podgrupe:

a) magnetno kolo sa četiri, odnosno pet stubova koje se retko koristi kod energetskih već uglavnom kod mernih transformatora.

b) tri monofazna magnetna kola (tri monofazna transformatora, rešenje poznato kao *američki* tip transformatora).

Što se tiče direktnih i inverznih magnetnih flukseva slika magnetnog polja je ista kod svih rešenja, a razlika se ispoljava samo kod nultih flukseva, tj. kod puteva kojima se oni zatvaraju.

I) Magnetno kolo sa povratnim putem za nulti fluks sa velikom magnetnom otpornošću, prikazano je na sl. 9.1.



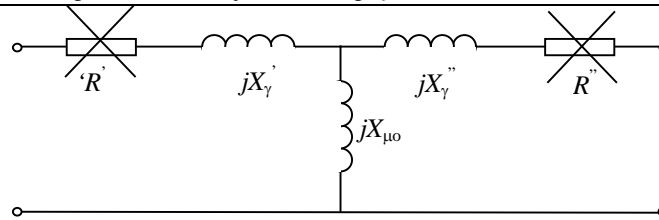
Sl. 9.1 Trostubno magnetno jezgro sa povratnim putem nultog fluksa kroz vazduh

Sa sl. 9.1 se vidi da je povratni put za $3\Phi_0$ (trostruki nulti fluks) put velike magnetne otpornosti (male magnetne provodnosti, niske permeabilnosti). Odgovarajuća ekvivalentna (monofazna) šema transformatora u tom slučaju je prikazana na sl. 9.2.

Na sl. 9.2 formalno su prikazane i aktivne otpornosti primara i sekundara ali su simbolično precrtane kako bi se ukazalo da su bez uticaja kad se uporede sa reaktansama većih energetskih transformatora (odnos 1:10, tipično). Pošto se nulti fluksevi u ovakvom primeru zatvaraju putevima rasipanja, putevima velike magnetne otpornosti, R_μ , to se onda zaključuje da je ova aktivna magnetna otpornost vrlo visoka, iz čega sledi da je induktivnost mala, a samim tim je mala i reaktansa $X_{\mu 0}$ (reaktansa magnećenja koja odgovara nultom fluksu). Ovo je posledica činjenice da se induktivnosti namotaja transformatora, L , izračunavaju kao:

$$L = \frac{N^2}{R_\mu} \quad (9.1)$$

gde je R_μ magnetna otpornost puta kojim se zatvaraju nulti fluksevi. Broj navojaka u namotaju transformatora označen je sa N . Pošto se ova magnetna otpornost analitički teško određuje, to se u ovakvim slučajevima pokazuje da reaktansa ($X_{\mu 0}$) tipično varira od 30÷100%, i da je osetno manja od reaktanse direktnog redosleda o kojoj će biti još reči.

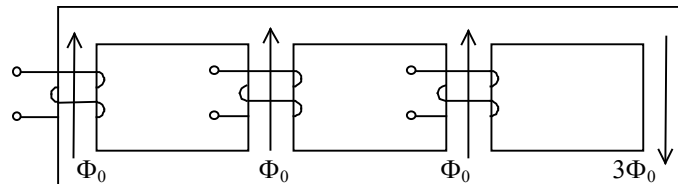


SI. 9.2 Ekvivalentna nulta šema transformatora sa trostubnim jezgrom

II) Magnetna kola sa povratnim putem za nulti fluks sa malom magnetnom otpornošću

a) Četvorostubno jezgro

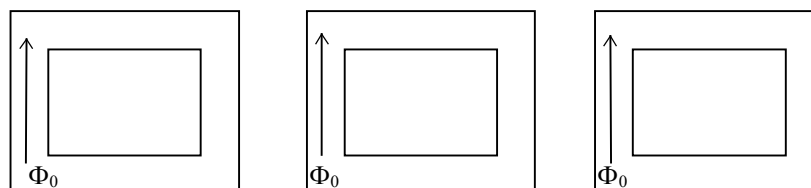
Kod ovakvih rešenja magnetnih kola trostruki nulti fluks ($3\Phi_0$) se vraća kroz gvozdено jezgro, odnosno putevima male magnetne otpornosti, a što je prikazano na sl. 9.3.



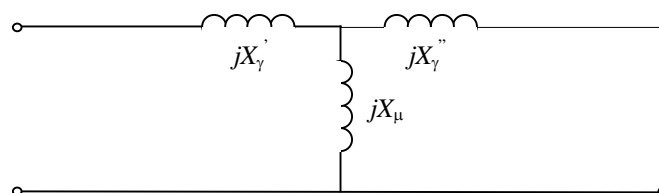
SI. 9.3 Ilustracija četvorostubnog magnetnog jezgra

b) Tri monofazne jedinice

Sa gledišta fizičke slike slučaju četvorostubnog jezgra potpuno je analogna situacija i sa rešenjima magnetnog kola sa tri monofazne odvojene jedinice (*američka* verzija velikih energetske transformatora), pošto se i ovde nulti fluksevi zatvaraju putevima male magnetne otpornosti, sl. 9.4.



SI. 9.4 Ilustracija magnetnog kola sa tri monofazne jedinice



SI. 9.5. Ekvivalentna nulta šema transformatora sa povratnim putem nultog fluksa kroz gvožđe

Kod oba ova slučaja svaki od nultih flukseva ima svoj nezavisan put kroz gvozdено jezgro. Iz tih razloga nulta reaktansa magnećenja jednaka je kao i za direktni i inverzni sistem, pa je na sl. 9.5 ova nulta reaktansa obeležena samo sa X_{μ} . Čak se kod ovakvih rešenja može desiti da je trostruki nulti fluks ($3\Phi_0$) dovoljan da se izazove i zasićenje magnetnog kola. Kako je pri zasićenju radna tačka u nelinearnom delu karakteristike magnećenja, tada velikim porastima struje odgovaraju mali porasti napona, odnosno i tada bi se imalo $X_{\mu 0} < X_{\mu d}$.

Direktna, odnosno u ovom slučaju i nulta, reaktansa magnećenja je kod ovakvih rešenja magnetnog jezgra (bez zasićenja magnetnog kola):

$$X_{\mu d} \% = \frac{X_{\mu}}{U_n} I_n \cdot 100 \tag{9.2}$$

Brojitelj u prethodnom obrascu, X_{μ} u Ω , se najlakše utvrđuje eksperimentalno, ogledom praznog hoda transformatora, tako što se na krajeve primara dovede nominalni napon, U_n , i izmeri se struja, koja je tada baš struja praznog hoda I_0 . Dakle, ima se:

$$X_{\mu} = \frac{U_n}{I_0} \quad (9.3)$$

Ako se izraz (9.2) preuredi tako da se nominalna struja prebaci u imenitelj, tada se u imenitelju ima nazivna impedansa transformatora, odnosno bazna vrednost impedanse kod uvođenja jediničnog sistema. Kako je procentualna vrednost struje praznog hoda:

$$i_0\% = \frac{I_0}{I_n} 100\% \quad (9.4)$$

to se zamenom (9.3) u (9.2), a uz uvažavanje (9.4), dobija:

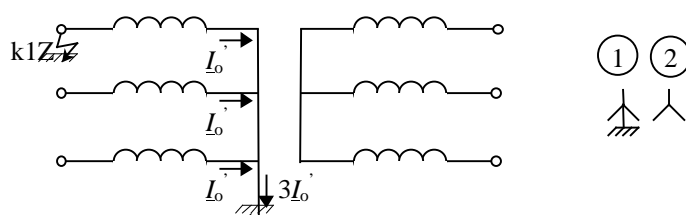
$$X_{\mu d}\% = \frac{I_n}{I_n} \frac{10^4}{i_0\%} = \frac{10^4}{i_0\%} \quad (9.5)$$

Kako je $i_0\%$ reda jednog do nekoliko procenata kod velikih energetskih transformatora (za veće transformatore procentualna struja praznog hoda je manja), to su tipične vrednosti za direktnu reaktansu magnećenja, a za ovakve tipove magnetnih kola i za nultu reaktansu magnećenja, od 4000% do 10000% (ako je $i_0\%$ baš 1%, tada je u ovakvim situacijama $X_{\mu d} = X_{\mu 0} = 10000\%$). Ako se pažljivije analizira ekvivalentna nulta šema transformatora sa povratnim putem nultog fluksa kroz gvožđe, i ako se nadalje uzme da su reaktanse primara i sekundara približno jednake (ako je npr. ukupno rasipanje transformatora 10%, tada se može uyeti da je $X'_{\gamma} \approx X''_{\gamma} \approx 5\%$), i ako je nulta reaktansa rasipanja $X_{\mu 0} \approx 10000\%$, tada je jasno da je efekat otočne grane za inženjerske račune zanemarljiv. Kod tačnijih proračuna eventualno se otočna grana (odnosno $X_{\mu 0}$) može uvažiti u slučajevima sa četverostubnim magnetnim jezgrom kod koga je radna tačka u nelinearnom delu karakteristike magnećenja (zasićenje), jer su tada vrednosti za nultu reaktansu magnećenja nešto manje. Interesantno je ukazati da je procentualna vrednost struje praznog hoda energetskih transformatora manja od odgovarajućih vrednosti struja praznog hoda za asinhronu i sinhronu mašine, jer se kod obrtnih mašina i međugvožđe treba namagnetisati.

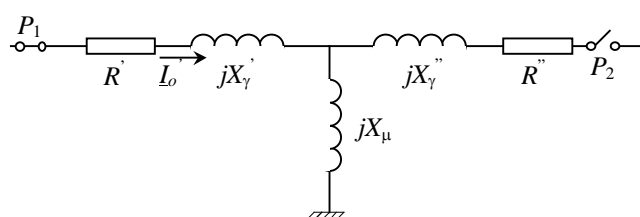
Treba pomenuti da su u prethodnim izrazima sve veličine date sa svojim faznim vrednostima.

9.2. Uticaj načina uzemljenja zvezdišta i sprega traansformatora na nulte šeme transformatora

Uticaj načina uzemljenja zvezdišta na nulte ekvivalentne šeme energetskih transformatora je od odlučujućeg značaja. Kod proučavanja nultih šema važno je ukazati da su nulte struje naizmenične prirode i da su jednovremene u sve tri faze. Radi ilustracije ovog uticaja biće obrađeno nekoliko karakterističnih sprega da bi se tretman zvezdišta izučio sa aspekta nultih šema transformatora. Najpre će biti obrađena sprega *uzemljena zvezda – izolovana zvezda*. Odgovarajuća trofazna šema prikazana je na sl. 9.6, a njoj korespondentna nulta ekvivalentna (monofazna) šema energetskog transformatoraje nacrtana na sl. 9.7.



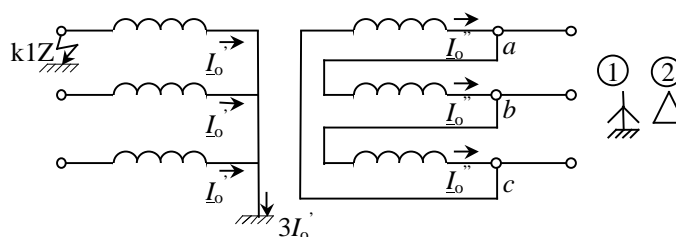
Sl. 9.6 Trofazna šema sprega *uzemljena zvezda – izolovana zvezda* saa odgovarajućim simboličnim označavanjem (desno)



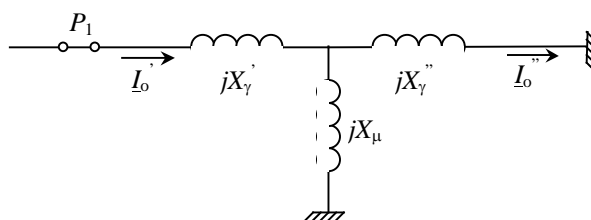
Sl. 9.7 Ekvivalentna nulta šema sprega *uzemljena zvezda – izolovana zvezda*

U cilju sagledavanja efekata kvara sa različitih strana transformatora najpre se pretpostavlja nesimetričan otočni kvar sa zemljom (npr. $k1Z$), na strani uzemljene zvezde (primarna strana transformatora sa strujom I'_0 , odnosno strana 1), kako bi se imali uslovi postojanja nultih struja. Mesto nesimetrije kvara je generator nultih struja koje formiraju nulte flukseve u transformatoru. Ovi nulti fluksevi indukuju nulte ems u sekundaru, ali se ne javljaju nulte struje, jer je nulta impedansa beskonačno velika na strani sekundara (izolovano sekundarno zvezdište). Kada je ista vrsta kvara ($k1Z$) na strani neuzemljene

zvezde tada se, iz ovog razloga, ne mogu se zatvoriti nulte komponente struja. U monofaznim šemama na slici, kao i u narednim analizama, teče (po jedna) struja I_o' , jer se radi upravo sa jednofaznim šemama. Efekat beskonačno velike nulte impedanse u sekundarnom kolu je simuliran na sl. 9.7 sa otvorenim prekidačem P_2 . S druge strane, prekidač P_1 u primarnom kolu je zatvoren, čime se ukazuje da nulte struje teku kroz primarne namotaje. Naravno, na transformator kao element sistema vezani su i sa leve i sa desne strane ostali elementi sistema. Jasno se vidi da ako je $k1Z$ sa desne strane, da nulte struje tada ne mogu da teku jer je prekidač P_2 otvoren.



Sl. 9.8 Trofazna šema sprege uzemljena zvezda - trougao



Sl. 9.9 Ekvivalentna nulta šema sprege uzemljena zvezda – trougao

Kao sledeći karakterističan primer biće obrađena veoma česta sprega u EES-u, *uzemljena zvezda-trougao* (Yd sprega).

Ova sprega, sa trouglom na strani generatora, je tipična u elektranama, a sa trouglom na strani potrošačkog područja je tipična u distributivnim mrežama. Odgovarajuća trofazna šema prikazana je na sl. 9.8, a monofazna ekvivalentna šema za kvar na strani uzemljene zvezde (npr. $k1Z$), prikazana je na sl. 9.9.

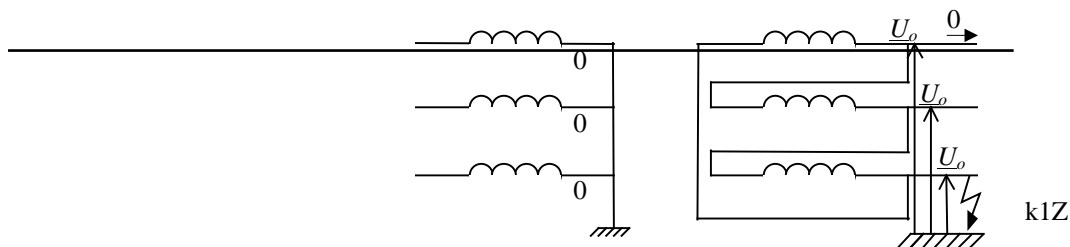
U slučaju nesimetričnog otočnog kvara sa zemljom koji se dešava na strani uzemljene zvezde, nulte struje teku kroz namotaje zvezde i kao posledica te činjenice nulti fluksevi indukuju sekundarne nulte *ems*, E_o'' . Ovo su tri jednovremene *ems* i kao posledica njihovog postojanja u svakoj od faza teku identične nulte struje I_o' . Ako se proverí I Kirchoff-ov zakon za tačku *b* (koja predstavlja izvod faze *b*), tada se jasno konstatuje da nultih struja nema van trougla. Dakle, nulte struje teku u trouglu, ali ne izlaze van njega, tako da se trougao ponaša zaprečno za nulte struje. U ekvivalentnoj (monofaznoj) šemi je to označeno sa nultim potencijalom, odnosno završetkom nultog kola na strani trougla.

Na identičan način kako se ponašaju nulte struje, ponašaju se i struje trećeg harmonika (kao i svih ostalih viših harmonika čiji je red multipl broja 3). Generatori trećeg harmonika u EES-u mogu da budu nelinearnosti koje su posledica karakteristike magnećenja feromagnetnih materijala (gvožđe).

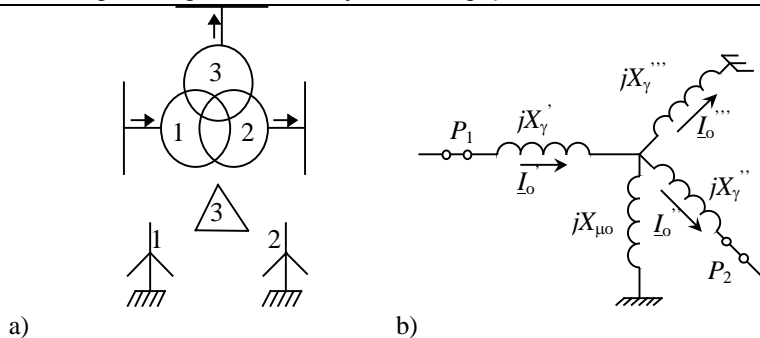
U elektranama se na visokonaponskoj strani postavlja uzemljena zvezda, a na niženaponskoj strani trougao, kako bi se sprečio prolaz trećeg, odnosno viših harmonika daalje u mrežu, harmonika u mrežu.

U situacijama kada je nesimetrija sa strane trougla ima se sledeća šema, sl. 9.10. Razlika potencijala za nulti komponentni sistem na namotajima trougla je $(U_o - U_o)$ pa se zaključuje da nema nultih struja u trouglu.

Kao naredni karakterističan primer biće obrađen slučaj tronamotajnog trofaznog transformatora, sl.9.11a, sa odgovarajućom nultom ekvivalentnom (monofaznom) šemom prikazanom na sl.9.11b. Saglasno prethodnim razmatranjima prekidači P_1 i P_2 su zatvoreni u primarnom i u sekundarnom kolu, dok je u tercijarnom kolu, zbog sprege tercijarnog namotaja u trougao, kraj kola u nultoj šemi.

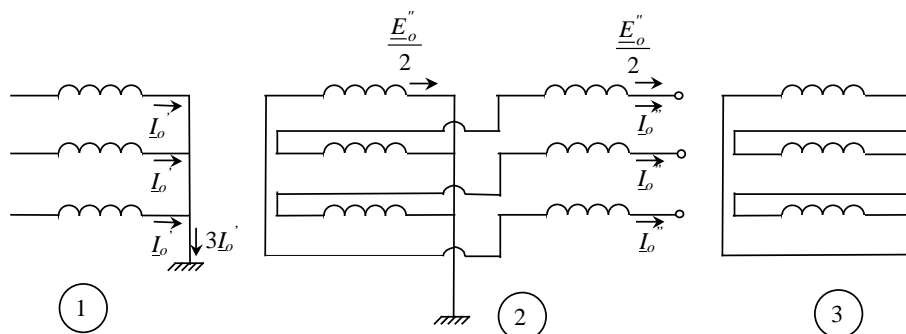


Sl. 9.10 Trofazna šema sprege uzemljena zvezda – trougao za slučaj kvara na strani trougla



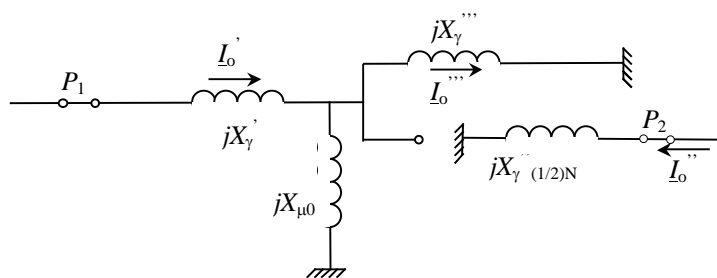
Sl. 9.11 Šema sprege (a) i nulta ekvivalentna šema (b) tronamotajnog transformatora sprege: uzemljena zvezda – uzemljena zvezda - trougao

Pošto se sprega *slomljena zvezda-zvezda* često koristi u distributivnim mrežama, kod transformacije srednji napon na niski napon, to je kao naredni karakterističan primer obraden slučaj tronamotajnog trofaznog transformatora sa spregama *uzemljena zvezda* na primaru, *uzemljena slomljena zvezda* na sekundaru i sa spregom *trougao* na tercijaru, trofazno prikazan na sl. 9.12, sa simboličnom oznakom Yzd.



Sl. 9.12 Trofazni prikaz tronamotajnog transformatora sprege uzemljena zvezda – uzemljena slomljena zvezda - trougao

Ako je nesimetričan otočni kvar (npr. k1Z) na strani uzemljene zvezde, odnosno na primarnoj strani, tada nulte struje teku normalno kroz namotaje primara, tako da je prekidač P_1 zatvoren na nultoj ekvivalentnoj (monofaznoj) šemi na sl. 9.13. Iz tog razloga imaju se nulte primarne mps, nulti fluksevi i indukovane nulte ems po svim namotajima. Međutim, prilike na sekundaru su takve da se indukovane nulte ems na sekundaru međusobno poništavaju po svakom od namotaja (njihov zbir na dva polunamotaja je nula). To je efekat kontravezivanja polunamotaja, $(E_o''/2) - (E_o''/2) = 0$, pa sledi da nema nultih struja u slomljenoj zvezdi, odnosno na sekundarnoj strani. Dakle, za slučaj k1Z na strani *uzemljene zvezde*, nulte struje teku na strani primara i tercijara. Ovo je grafički očevidno na sl. 9.12 pošto se prema sekundaru imaa prekid.

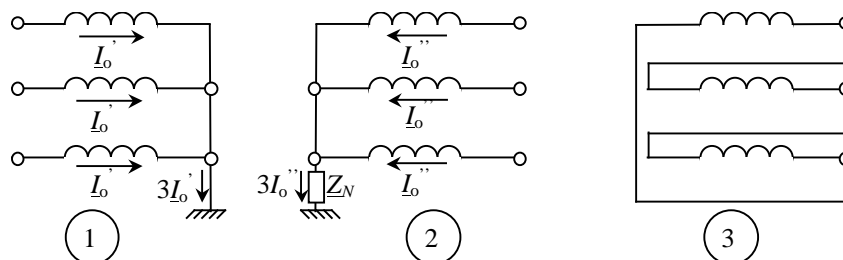


Sl. 9.13 Nulta ekvivalentna (monofazna) šema tronamotajnog transformatora sprege uzemljena zvezda – uzemljena slomljena zvezda - trougao

Za slučaj kvara (k1Z) na strani sekundara, odnosno na strani *slomljene zvezde*, vidi se da nulte struje u tim okolnostima tada teku kroz polunamotaje *slomljene zvezde*, prekidač P_2 je zatvoren. One stvaraju nulte mps koje su međusobno zbog kontravezivanja namotaja suprotstavljene, pa sledi da je rezultatna mps po svakom stubu jednaka nuli. Dakle, efekat nultih struja se ne prenosi dalje, već se sve završava u okviru *slomljene zvezde*. Zaključuje se da je korespondentna nulta ekvivalentna (monofazna) šema u ovom slučaju određena samo nekom reaktansom na sekundaru.

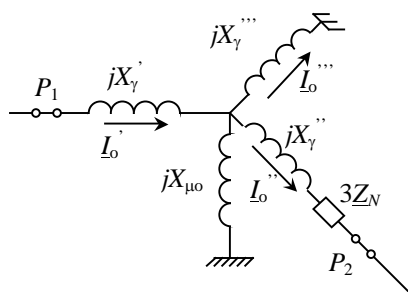
Sekundarni namotaji, namotaji na strani slomljene zvezde u analiziranom slučaju, sastoje se od dva polunamotaja po svakom stubu magnetnog kola. Rasipanje primara i sekundara je približno jednako kod distributivnih transformatora manjih snaga koji su ove sprege i koji se često koriste u distributivnim mrežama. Od ukupnog rasipanja od npr. 4%, 2% je rasipanje na primaru, a 2% rasipanje na sekundaru u takvim okolnostima. Kako su induktivnosti, odnosno reaktanse, rasipanja namotaja srazmerne sa kvadratom broja navojaka u namotaju ($L = N^2 / R_{\mu}$), to se zaključuje da je induktivnost rasipanja polunamotaja 4 puta manja od induktivnosti rasipanja punog namotaja. Dakle, ako je $X''_{\gamma} \approx 2\%$ (rasipanje punog sekundarnog namotaja) tada je rasipanje polunamotaja 0,5%. Ali, u električnoj šemi su po dva polunamotaja vezana na red, tako da je reaktansa rasipanja sekundara sa *slomljenom zvezdom* $X''_{\gamma(1/2)N} \approx 1\%$ po fazi.

Posledica ovako niskih reaktansi rasipanja u sekundarnom kolu je da struje kvara na strani slomljene zvezde mogu biti veoma visoke pošto su ograničene samo ovom malom reaktansom rasipanja.



Sl. 9.14 Trofazni prikaz tronamotajnog transformatora sprege *uzemljena zvezda – zvezda uzemljena preko impedanse - trougao*

Na kraju ovih objašnjenja biće analiziran slučaj tronamotajnog trofaznog transformatora sa primarom koji je *uzemljena zvezda*, sekundarom sa *zvezdom uzemljenom* preko impedanse uzemljenja Z_N (impedansa vezana u neutralnoj tački) i sa tercijarom spregnutim u *trougao*, koji služi kao kompenzacioni namotaj, sl. 9.14. Saglasno prethodnim objašnjenjima, na sl. 9.15, na kojoj je prikazana nulta ekvivalentna (monofazna) šema ovog tronamotajnog transformatora, prekidači P_1 i P_2 su zatvoreni, a u monofaznoj šemi u sekundarnom kolu je impedansa $3Z_N$. Razlozi za trostruku vrednost impedanse uzemljenja (koja je u suštini prebačena iz povratnog puta nulte struje u fazni provodnik) su posledica zahteva da padovi napona moraju ostati na njoj isti. Kako u povratnom kolu kroz tu impedansu teče trostruka nulta struja, a u faznom kolu samo jednostruka, to se impedansa mora uvećati tri puta.



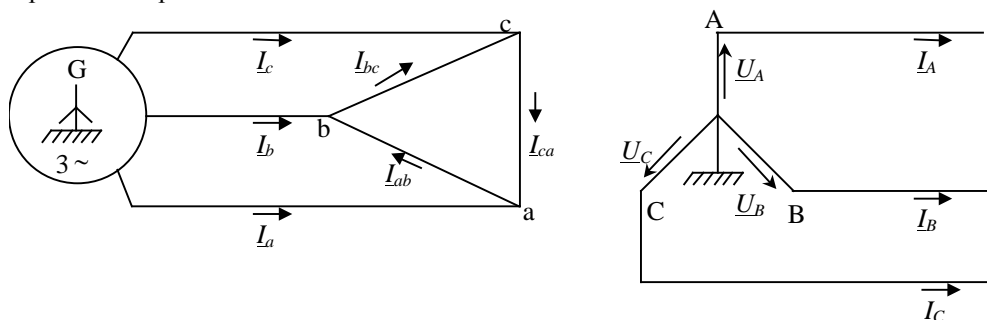
Sl. 9.15 Nulta ekvivalentna šema tronamotajnog transformatora sprege *uzemljena zvezda – zvezda uzemljena preko impedanse - trougao*

Prethodno analizirani slučajevi su odabrani kao tipični praktični primeri. Međutim, za bilo koji tip sprege, nulta ekvivalentna (monofazna) šema transformatora može se nacrtati ako se primene sledeća pravila:

- proveriti se da li sprega transformatora dozvoljava zatvaranje nulte struje kroz zemlju. Ako ne, tada nulta šema ima prekid iza namotaja koji to ne dozvoljava (kod *izolovane zvezde* prekid je iza nje, sl. 9.6);
- proveriti se da li su nulte struje prinuđene zbog sprege da cirkulišu po nekom od namotaja. Ako jesu, tada se u šemi formira završetak nultog kola (kratka veza prema zemlji) koja ukazuje da nulte struje ne odlaze iz tog namotaja (slučaj *trougla* na sl. 9.9);
- ako zatvaranja nulte struje kroz zemlju nema, tada nulta šema mora sadržati reaktansu magnećenja u grani kojom se ekvivalentira takav namotaj (sl. 9.7);
- ako nulte struje teku kroz nultu ekvivalentnu šemu transformatora slobodno, tada se u ekvivalentnoj šemi prikazuju najčešće samo reaktanse rasipanja za grane kojima se ekvivalentira takav namotaj.

U cilju ilustracije uticaja spreznog broja na nulte ekvivalentne šeme transformatora biće analizirano prenošenje direktne, inverzne i nulte komponente struje i napona, za slučaj nesimetrije na strani uzemljene zvezde, kroz transformator sprege Yd5. Ova sprega je odabrana iz razloga što se često koristi u EES-ima. Tipična takva sprega se susreće kod blok transformatora. Na osnovu ove analize moguće je relativno lako analizirati i slučajeve sa drugačijim sprežnim brojevima.

Po definiciji oznaka Yd5 znači da fazori napona faze A na višenaponskoj strani, prednjače odgovarajućem fazoru na niženaponskoj strani za $5 \cdot 30^\circ$. Naredna matematička analiza će pokazati da se nulte struje ne prenose kroz trougao, tj. da nema prolaza nultog sistema kroz Yd5 spregu, ako je kvar na strani mreže, odnosno na strani uzemljene zvezde. Ovo je već objašnjeno fizičkim rezonima u prethodnim primerima.



Sl. 9.16 Ilustracija uticaja spreznog broja na prenošenje nultih struja kroz transformator

Sa sl. 9.16 grafički je u trofaznoj interpretaciji jasno označeno da namotaju ab na niženaponskoj strani, geometrijski odgovara namotaj B na višenaponskoj strani, dok namotaju ac na niženaponskoj strani, geometrijski je korespondentan namotaj A na višenaponskoj strani.

Struja faze a na niženaponskoj strani se može povezati sa korespondentnim strujama na višenaponskoj strani, koristeći jednačinu ravnoteže mps po svakom stubu (idealizovanog) magnetnog kola:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca} = (\underline{I}_B - \underline{I}_A) \frac{m_T}{\sqrt{3}} = (\underline{I}_B - \underline{I}_A) \frac{n_Y}{n_\Delta} \quad (9.6.a)$$

gde je:

$$\frac{n_Y}{n_\Delta} = \frac{m_T}{\sqrt{3}} \quad (9.6.b)$$

Važno je ukazati da je jednakost (9.6.a) validna samo za magnetna kola sa magnetnom otpornošću jednakom nuli.

Parazitni koeficijent $1/\sqrt{3}$ u (9.6) se pojavljuje zato što je po definiciji prenosni odnos transformatora količnik linijskih nominalnih napona višenaponske i niženaponske strane. Kako se na strani zvezde ima fazni napon, a na strani trougla je međufazni napon, to se mora pojaviti korekcija u vidu parazitnog koeficijenta (n_Y je broj navojaka na strani zvezde, a n_Δ je broj navojaka na strani trougla).

Ako se struje koje figurišu u (9.6.a) prikažu preko simetričnih komponenti tada se ima:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{ai} + \underline{I}_{a0} = \frac{m_T}{\sqrt{3}} \left[(\underline{a}^2 \underline{I}_{Ad} + \underline{a} \underline{I}_{Ai} + \underline{I}_{A0}) - (\underline{I}_{Ad} + \underline{I}_{Ai} + \underline{I}_{A0}) \right] \quad (9.7)$$

Posle formalnog potiranja \underline{I}_{A0} na desnoj strani, vidi se da nema nultih struja na niženaponskoj strani, odnosno dobija se:

$$\underline{I}_a = \frac{m_T}{\sqrt{3}} \left[\underline{I}_{Ad} (\underline{a}^2 - 1) + \underline{I}_{Ai} (\underline{a} - 1) \right] \quad (9.8)$$

U prethodnoj relaciji je:

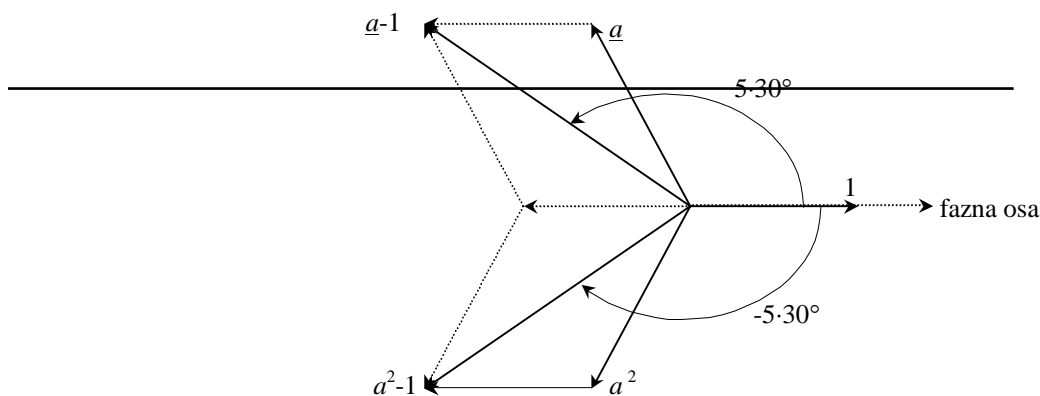
$$\underline{a}^2 - 1 = \sqrt{3} e^{-j5.30^\circ}; \quad \underline{a} - 1 = \sqrt{3} e^{j5.30^\circ}$$

a što je ilustrovano na sl. 9.17. Prema tome dobija se:

$$\underline{I}_a = m_T \left[\underline{I}_{Ad} e^{-j5.30^\circ} + \underline{I}_{Ai} e^{j5.30^\circ} \right] \quad (9.9.a)$$

Pošto je naravno:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{ai} + \underline{I}_{a0} \quad (9.9.b)$$



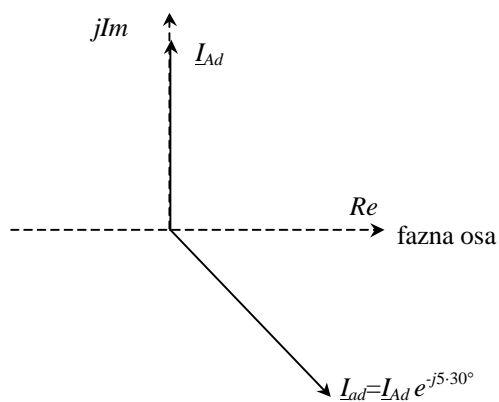
Sl. 9.17 Ilustracija sabiranja kompleksnih operatora

To se formalnim poređenjem relacija (9.9) dobija:

$$\underline{I}_{ad} = m_T \underline{I}_{Ad} e^{-j5.30^\circ} \quad (9.10)$$

$$\underline{I}_{ai} = m_T \underline{I}_{Ai} e^{+j5.30^\circ} \quad (9.11)$$

Relacija (9.10) je grafički ilustrovana na sl. 9.18 za $m_T = 1$ i u pretpostavku da je \underline{I}_{Ad} po imaginarnoj osi. Analogna ilustracija bi se imala i za inverznu komponentu struje faze a na niženaponskoj strani.



Sl. 9.18 Ilustracija položaja korespondentnih fazora struja na višenaponskoj i niženaponskoj strani

10. Modelovanje sinhronih generatora i ostalih elemenata sistema za potrebe proračuna struja kratkih spojeva

10.1. Osnovne matrice jednačine sinhronog generatora sa Parkovom transformacijom

Razlika u odnosu na model generatora izložen u poglavlju 2, model koji je bio primeren proračunima stacionarnih stanja, leži u potrebi za modelovanjem prelaznih procesa u generatoru. Određivanje impedansi direktnog, inverznog i nultog redosleda je složen zadatak jer spregnuta magnetna kola u generatoru zbog obrtanja rotora menjaju svoj međusobni položaj i impedanse gledane sa krajeva mašine se periodično menjaju. Pored toga, fenomeni kao aperiodična komponenta struje kvara, nelinearnost magnetnih kola i drugi, takođe moraju biti obuhvaćeni ili pažljivo diskutovani, u smislu kad se mogu, a kad ne mogu, zanemariti za potrebe određivanja impedansi mašine. Model koji podrazumeva vremensku nepromenljivost efektivnih vrednosti radnih veličina u generatoru i mogućnost direktnog korišćenja fazorskog računa je predstavljao osnovu za proračune stacionarnih stanja. Međutim, kod problema gde se mora izračunati (vremenska) dinamika taj model nije dovoljan.

Sinhroni generator, odnosno u opštem slučaju sinhrona mašina, modeluje se na različite načine sa aspekta različitih fenomena koji se žele proučiti. Pre svega modeli mogu biti linearni, ali ako se uvaži i zasićenje, tada i nelinearni. Ovde je cilj da se izloži linearan model u svojoj klasičnoj formi u cilju da se korektno reprezentuje ponašanje sinhronne mašine za vreme trajanja kratkog spoja (koji može da bude lociran ili na samim krajevima mašine, ili negde u mreži) u subtranzijentnom, tranzijentnom i ustaljenom periodu trajanja kvara. Trajanje kratkog spoja određeno je vremenima detekcije i eliminacije kvara (sadejstvo zaštite i prekidača) i iznosi od reda nekoliko perioda pa sve do nekoliko sekundi, u zavisnosti od naponskog nivoa mreže i načina uzemljenja zvezdišta. Subtranzijentni period traje do 0,1 s, a tranzijentni čak do 6 s od momenta nastanka kvara. Ustaljeni period kvara započinje posle iščezavanja tranzijentnog perioda, ali do njega se (sem u situacijama sa zemljospojem) obično ne dolazi pošto zaštita reaguje po pravilu pre.

Na sl. 10.1 je predstavljen poprečni presek hidrogeneratora, tj. generatora sa istaknutim polovima kao opšteg reprezentanta sinhronih generatora. Naime, generatori sa cilindričnim rotorom mogu se uglavnom tretirati kao specijalan slučaj generatora sa istaknutim polovima.

Oznake na slici imaju sledeće značenje:

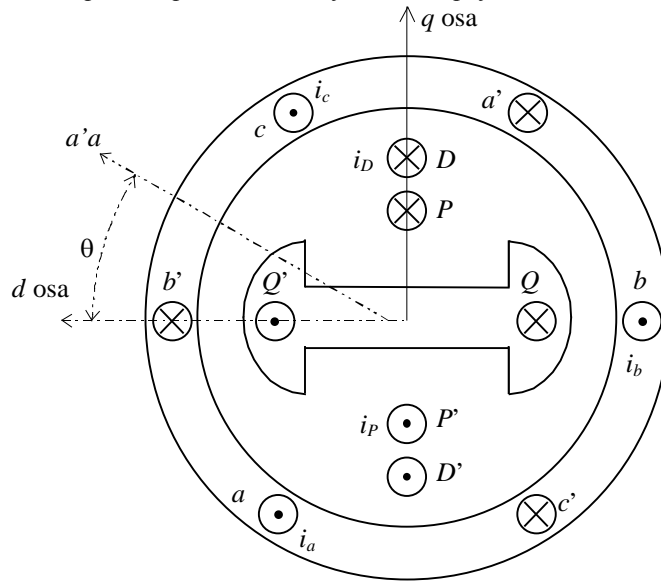
$a-a'$ namotaj faze a ,

$b-b'$ namotaj faze b i

$c-c'$ namotaj faze c .

Sa $P-P'$ je obeležen pobudni namotaj.

Prema tome na statoru postoje tri statorska namotaja: $a-a'$, $b-b'$ i $c-c'$, dok su na rotoru dva namotaja: pobudni i prigušni. Pobudni namotaj je tako postavljen da je glavni pobudni fluks skoncentrisan po d osi. Kod hidrogeneratora se prigušni namotaj konstruktivno odvojeno izvodi. Kod turbogeneratora, čak i ako prigušnog namotaja konstruktivno nema, cilindrični rotor po prirodi stvari ima provodne delove i indukovane struje u njemu predstavljaju prigušni namotaj. Efekat prigušnog namotaja se oseća i po d i po q osi (namotaji $D-D'$ i $Q-Q'$). Dakle, $D-D'$ simulira efekat prigušnog namotaja po d osi, a $Q-Q'$ simulira efekat prigušnog namotaja po q osi. Sa slike se vidi da d osa prednjači q osi ako se ima u vidu pozitivan matematički smer koji je suprotan smeru kretanja kazaljke na časovniku. Treba ukazati da je izbor koja od osa kojoj prednjači sasvim proizvoljan i da se koriste obe varijante, ali usvojeni redosled ima posledice na znakove pojedinih članova u jednačinama (prema IEEE preporukama q osa prednjači d osi).



Sl. 10.1 Poprečni presek hidrogenatora

Osnovna matricna naponska jednačina u vremenskom domenu je oblika:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_P \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & & & & & \\ & R_s & & & & \\ & & R_s & & & \\ & & & R_P & & \\ & & & & R_D & \\ & & & & & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_P \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{aa'} \\ \Psi_{bb'} \\ \Psi_{cc'} \\ \Psi_{PP'} \\ \Psi_{DD'} \\ \Psi_{QQ'} \end{bmatrix} \quad (10.1)$$

Naponi, struje i fluksni obuhvati u ovoj jednačini su radne veličine u vremenskom domenu. Sa R_s je obeležena aktivna otpornost statorskog namotaja, sa R_P aktivna otpornost pobudnog namotaja, a sa R_D i R_Q aktivne otpornosti prigušnog namotaja po d i q osi. Indeksi rotorskih veličina su označeni velikim slovima, a indeksi statorskih veličina malim slovima. Ova osnovna matricna relacija je ispisana za generatorske smerove. U njoj ems , kao prvi izvod fluksnog obuhvata po vremenu (sa promenjenim znakom), pokriva pad napona na aktivnim otpornostima i formira napone na izlazima iz generatora. Naravno, naponska jednačina za pobudni namotaj i za ostale namotaje na rotoru je suprotnog smisla, jer napon na ulazu u pobudni namotaj pokriva sve padove napona i pridruženu ems . Treba ukazati da su naponi u_D i u_Q ustvari jednaki nuli, jer su prigušni namotaji kratko spojeni (dakle, $u_D = u_Q = 0$). Sa usvojenim pretpostavkama odgovarajući 6-komponentni vektor napona ima sledeći izgled:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ -u_P \\ -u_D \\ -u_Q \end{bmatrix} \quad (10.2)$$

Fluksevi i struje koji figurišu u relaciji (10.1) su povezani preko matrice induktivnosti koja je funkcija ugla θ (ugaoni pomeraj između direktne ose i magnetne ose faze a , definisan na sl. 10.1):

$$\Psi = L(\theta) \mathbf{i} \quad (10.3)$$

U relaciji (10.3) dimenzije svih vektora odgovaraju pretpostavljenom broju namotaja sinhronog generatora (3 na statoru i 3 na rotoru), pa su ovi vektori reda 6.

Analogno su strukturirani i vektori napona i flukseva dok je matrica induktivnosti dimenzija 6x6, sledećeg oblika:

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) & L_{aP}(\theta) & L_{aD}(\theta) & L_{aQ}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) & L_{bP}(\theta) & L_{bD}(\theta) & L_{bQ}(\theta) \\ L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) & L_{cP}(\theta) & L_{cD}(\theta) & L_{cQ}(\theta) \\ L_{Pa}(\theta) & L_{Pb}(\theta) & L_{Pc}(\theta) & L_{PP}(\theta) & L_{PD}(\theta) & L_{PQ}(\theta) \\ L_{Da}(\theta) & L_{Db}(\theta) & L_{Dc}(\theta) & L_{DP}(\theta) & L_{DD}(\theta) & L_{DQ}(\theta) \\ L_{Qa}(\theta) & L_{Qb}(\theta) & L_{Qc}(\theta) & L_{QP}(\theta) & L_{QD}(\theta) & L_{QQ}(\theta) \end{bmatrix} \quad (10.4)$$

Iz strukture matrice induktivnosti očevidno je da su u njoj prisutne statorske sopstvene i statorske međusobne induktivnosti, rotorske sopstvene i rotorske međusobne induktivnosti, kao i međusobne induktivnosti između statora i rotora, pošto je reč o 6 nezavisnih, ali magnetno spregnutih kola. Polazeći od osnovnih matričnih jednačina (10.1) i (10.2) i diferencirajući flukseve po vremenu dobija se:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R} \mathbf{i} - \mathbf{i} \frac{d}{dt} \mathbf{L}(\theta) - \mathbf{L}(\theta) \frac{d\mathbf{i}}{dt} \quad (10.5)$$

Iz relacije (10.5) je i formalno jasno da je poželjno izbeći zavisnost induktivnosti od ugla i time automatski dobiti osetno jednostavnije izraze. Transformacija koja to omogućava poznata je pod imenom Parkova transformacija.

Pomoću Parkove transformacije se sve statorske veličine iz sistema faznih koordinata (a,b,c) , transformišu u novi koordinatni sistem (d,q,o) , tj. ona omogućava preslikavanje tipa:

$$\{a,b,c\} \rightarrow \{d,q,o\}.$$

Parkovom transformacijom se eliminišu zavisnosti induktivnosti od ugla θ , jer se statični (nerotirajući) statorski namotaji ovakvom transformacijom svode na rotirajuće (fiktivne) namotaje koji se obrću sinhrono sa rotorom. Naravno, pri tome je potrebno pokazati da raspregnute struje u (d,q,o) koordinatama proizvode iste flukseve kao i stvarne, fazne struje i_a, i_b i i_c .

Parkovu transformaciju je kroz fizičku interpretaciju moguće shvatiti tako da se rezultantno obrtno magnetno polje, nastalo kao posledica delovanja naizmeničnih statorskih faznih struja u svojim odgovarajućim namotajima (koje kao obrtno miruje u odnosu na rotor), može ostvariti sa jednosmernim strujama u d i q fiktivnim namotajima, koji rotiraju zajedno sa rotorom. Naravno da onda odgovarajuća matrica induktivnosti treba da postane konstantna matrica. Dakle, suštinska ideja kod uvođenja Parkove (ili Blondelove) transformacije je eliminisanje zavisnosti sopstvenih i međusobnih induktivnosti od ugla θ .

Iskazana preko struja Parkova transformacija izgleda ovako:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (10.6a)$$

odnosno

$$\mathbf{i}^{d,q,o} = \mathbf{P} \mathbf{i}^{a,b,c} \quad (10.6b)$$

U (10.6b) je matrica Parkove transformacije obeležena sa \mathbf{P} . Uvođenje koeficijenta $\sqrt{\frac{2}{3}}$ je potrebno zbog toga da matrica Parkove transformacije postane ortogonalna.

Međutim, posto Parkova transformacija ima efekat samo na fazne statorske struje sa ciljem njihovog svodenja na rotor, a rotorske struje pri tome treba da ostanu nepromenjene, to se uvodi nova matrica transformacije \mathbf{B} reda 6 kojom se formalno povezuju svih 6 radnih veličina od interesa u generatoru sa pripadajućim vektorima:

$$\mathbf{i}_B = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \\ i_P \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_P \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = \mathbf{B} \mathbf{i} \quad (10.7)$$

Smisao (sub)vektora struja u prethodnoj relaciji jeste da ukaže da se samo na (fazne) statorske struje odnosi Parkova transformacija. Iz ovih razloga u (10.7) uvedene su dve submatrice sa elementima nula, kao i jedinična submatrica sa jediničnim nenultim elementima na glavnoj dijagonali.

Kako je matrica Parkove transformacije, \mathbf{P} , nesingularna to se lako nalazi inverzna matrica:

$$\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P}^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (10.8)$$

Prema (10.7) i (10.8) pokazuje se da takođe važi i:

$$\mathbf{B}^{-1} = \mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{P}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (10.9)$$

Sada se polazeći od (10.3), a uz uvažavanje (10.7), dobija:

$$\mathbf{B}^{-1} \boldsymbol{\Psi}_B = \mathbf{L} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{i}_B$$

odnosno

$$\boldsymbol{\Psi}_B = \mathbf{B} \mathbf{L}(\theta) \mathbf{B}^{-1} \mathbf{i}_B = \mathbf{L}_B \mathbf{i}_B \quad (10.10)$$

Analogno relacijama (10.8) i (10.9) lako se pokazuje da je:

$$\mathbf{L}_B^T = \mathbf{L}_B \quad (10.11)$$

Time je pokazano da je matrica \mathbf{L}_B simetrična, jer je i polazna matrica \mathbf{L} simetrična. Indeks B u prethodnim relacijama ima isti smisao kao kod uvođenja analognog vektora struja.

Ako se sada matrica \mathbf{L} podeli na submatrice dobija se:

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11}(\theta) & \mathbf{L}_{12}(\theta) \\ \mathbf{L}_{21}(\theta) & \mathbf{L}_{22}(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s + L_m \cos 2\theta & -M_s - L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) & -M_s - L_m \cos 2\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right) & & & \\ -L_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) & L_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -M_s - L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) & & & \\ -M_s - L_m \cos 2\left(\theta + \frac{5\pi}{6}\right) & -M_s - L_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) & L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & & & \\ & & & \mathbf{L}_{12}(\theta) & & \\ & & & & L_P & M_R & 0 \\ & & & & M_R & L_D & 0 \\ & & & & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \quad (10.12)$$

Indeksi 1 i 2 odnose se na statorski i rotorski namotaj respektivno (izbegnut je indeks "s" da ne bi došlo do mešanja sa sopstvenim induktivnostima). Poređenjem sa (10.4) lako se identifikuju pojedini elementi matrice induktivnosti. Prema tome, elementi submatrice \mathbf{L}_{11} su sopstvene i međusobne induktivnosti statorskih namotaja, elementi submatrice \mathbf{L}_{12} (\mathbf{L}_{21}) su međusobne induktivnosti između statorskih i rotorskih namotaja, a elementi matrice \mathbf{L}_{22} su sopstvene i međusobne induktivnosti između rotorskih namotaja.

Pažljiva analiza ovih sopstvenih i međusobnih induktivnosti pokazuje sledeće zakonomernosti. Sopstvene induktivnosti statorskih namotaja nalaze se kao količnici fluksnog obuhvata oko odgovarajućih namotaja od interesa, kada postoji samo struja u tom analiziranom namotaju. Dakle, za namotaj faze a - a' se prema tome nalazi:

$$L_{aa} = \frac{\Psi_{aa}}{i_a} = L_s + L_m \cos 2\theta \quad (10.13a)$$

Ove sopstvene induktivnosti su za sve tri faze uvek pozitivne i iz tog razloga sledi da je $L_s > L_m$. Ako je u pitanju cilindričan rotor, tada je sopstvena induktivnost faze a baš $L_{aa} = L_s$ (prvi sabirak u 10.13a) i konstantna je pri bilo kom položaju

rotora. Međutim, kod rotora sa istaknutim polovima maksimum fluksa se ima kada se položaj d -ose rotora poklapa sa magnetnom osom faze a (tada m_p nailazi na najmanju magnetnu otpornost i stvara najviše fluksa). Minimum fluksa se ima kada je ugao θ baš 90° . Prema tome, promena sopstvene induktivnosti sa uglom u takvim okolnostima je π - periodična. Dakle, prvi sabirak predstavlja deo sopstvene induktivnosti koji ne zavisi od položaja rotora, a drugi sabirak predstavlja onaj deo sopstvene induktivnosti koji zavisi od položaja rotora. Analogno se ima za sopstvene induktivnosti faza b i c s tim da se maksimum fluksa, kod rotora sa istaknutim polovima, za fazu b dostiže sa kašnjenjem od $2\pi/3$ u odnosu na fazu a , a sa kašnjenjem $4\pi/3$ za fazu c .

Međusobna induktivnost između dva namotaja statora (npr. između namotaja faza a i b) se takođe menja sa položajem rotora kod mašina sa istaknutim polovima. Imajući u vidu pozitivne smerove struje i fluksa, vidi se sa sl. 10.1 da je ova induktivnost uvek negativna. Sabirak koji ne zavisi od pozicije rotora, označen sa M_s u 10.13b, je konstantan. Kod mašina sa cilindričnim rotorom sabirak koji zavisi od pozicije rotora, a čija amplituda je označena sa L_m , je nula. Takođe se sa ove slike vidi da se maksimalna vrednost ove induktivnosti ima kada direktna osa rotora pada tačno između ose posmatrane faze i ose faze koja kasni za njom, odnosno pri uglovima $(-\pi/6)$ i $(5\pi/6)$. Interesantno je ukazati da je amplituda promene međusobne induktivnosti gotovo ista kao i amplituda promene sopstvene induktivnosti, tako da su obe amplitude obeležene sa L_m . Ovo se dokazuje kako proračunima tako i eksperimentima. Slično se dobija i za međusobne induktivnosti između ostalih faza na statoru, s tim da su njihove promene sa uglom pomerene za $(2\pi/3)$ u odnosu na analiziranu međusobnu induktivnost L_{ab} . Prema tome, razmatrana međusobna induktivnost između statorskih namotaja a i b se analitički može iskazati kao:

$$L_{ab} = \frac{\Psi_{ab}}{i_a} = -(M_s + L_m \cos 2(\theta + \pi/6)) \quad (10.13b)$$

Međusobna induktivnost između namotaja faze a statora i pobudnog namotaja je najveća kada se direktna osa rotora poklapa sa magnetnom osom analizirane faze. U suprotnom položaju, posle 180° , ova međusobna induktivnost je jednaka po amplitudi, ali je suprotnog znaka. Dakle, njena promena je 2π -periodična. Ako se amplituda ove međusobne induktivnosti obeleži sa M_p , tada se ima:

$$L_{aP} = \frac{\Psi_{aa'}}{i_p} = M_p \cos \theta \quad (10.14)$$

Treba se podsetiti da je ovakva (ko)sinusoidalna promena neophodna da bi se dobila sinusoidalna ems praznog hoda na krajevima statorskih namotaja. Slično je i sa promenama međusobnih induktivnosti između statorskih namotaja i prigušnih namotaja, čije su amplitude obeležene sa M_D (amplituda međusobne induktivnosti između statorskih namotaja i prigušnog namotaja po d osi) i sa M_Q (amplituda međusobne induktivnosti između statorskih namotaja i prigušnog namotaja po q osi).

Sopstvene induktivnosti pobudnog namotaja su konstantne, jer je sopstveno magnetno kolo gledano sa rotora isto za sve ugaone položaje rotora, i označavaće se nadalje sa jednim indeksom koji određuje o kom namotaju na rotoru se radi. Tako se umesto oznake L_{pp} pojavljuje kraća oznaka L_p . Analogna interpretacija je i za sopstvene induktivnosti prigušnog namotaja po d i q osi, označene sa L_D i L_Q . Međusobne induktivnosti između rotorskih namotaja su takođe konstantne i obeležene su zbog kratkoće pisanja sa M_R u relaciji (10.12). Iz relacije (10.12) uočava se da su međusobne induktivnosti na rotoru, kad su namotaji međusobno ortogonalni, jednake nuli. Saglasno prethodnim razmatranjima o međusobnim induktivnostima između statora i rotora sledi da je submatrica L_{12} sledećeg oblika:

$$L_{12}(\theta) = L_{12}(\theta)^T = \begin{bmatrix} M_p \cos \theta & M_D \cos \theta & M_Q \sin \theta \\ M_p \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & M_D \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & M_Q \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ M_p \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & M_D \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & M_Q \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (10.15)$$

Jednostavnim manipulacijama se dalje lako pokazuje da je:

$$L_B = \begin{bmatrix} P L_{11}(\theta) P^T & P L_{12}(\theta) \\ L_{21}(\theta) P^T & L_{22} \end{bmatrix} \quad (10.16)$$

Kao što se i očekivalo L_{22} je ostalo nepromenjeno jer ne zavisi od θ . Primenom Parkove transformacije na submatricu sopstvenih i međusobnih induktivnosti na statoru se dobija:

$$P L_{11}(\theta) P^T = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} \quad (10.17)$$

Posle pažljivog analitičkog izvođenja izračunavaju se elementi na glavnoj dijagonali uvedeni u (10.17) kao:

$$L_d = L_S + M_S + \frac{3}{2}L_m \quad (10.18a)$$

$$L_q = L_S + M_S - \frac{3}{2}L_m \quad (10.18b)$$

$$L_o = L_S - 2M_S \quad (10.18c)$$

U (10.18a) L_d predstavlja induktivnost sinhronog generatora po d osi, u (10.18b) L_q predstavlja induktivnost sinhronog generatora po q osi a u (10.18c) L_o predstavlja nultu induktivnost sinhronog generatora. Ove induktivnosti, odnosno reaktanse, imaju poseban značaj kako u analizi ustaljenih tako i u analizi prelaznih stanja mašine. Posle primene Parkove transformacije na submatricu međusobnih induktivnosti između statora i rotora dobija se:

$$P L_{12}(\theta) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}}M_P & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_D & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q & 0 \end{bmatrix}^T \quad (10.19)$$

Saglasno (10.17) i (10.19) konačno se dobija:

$$L_B = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}}M_P & \sqrt{\frac{3}{2}}M_D & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}}M_P & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_D & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} L_P & M_R & 0 \\ M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (10.20)$$

Zbog preciznijeg objašnjenja treba ukazati da je međusobna induktivnost po direktnoj osi (između fiktivnog namotaja po d osi i pobudnog namotaja), L_{md} , ustvari baš $\sqrt{\frac{3}{2}}M_P$. Kako se fizički eksperimenti na mašinama rade merenjem reaktansi rasipanja to je u skladu sa prethodnim formulama moguće definisati induktivnost rasipanja za d osu, $L_{\gamma d}$, induktivnost rasipanja za pobudni namotaj, $L_{\gamma P}$, i induktivnost rasipanja za q osu, $L_{\gamma q}$:

$$L_{\gamma d} = L_d - \sqrt{\frac{3}{2}}M_P = L_d - L_{md} \quad (10.21a)$$

$$L_{\gamma P} = L_P - \sqrt{\frac{3}{2}}M_P = L_P - L_{md} \quad (10.21b)$$

$$L_{\gamma q} = L_q - \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q \quad (10.21c)$$

Induktivnost rasipanja za d osu predstavlja osnovu za formiranje transformatorskih šema sinhronog generatora i tamo će se o njoj govoriti jednostavno kao o reaktansi (induktivnosti) rasipanja statora, a podrazumevaće se da je po direktnoj osi. Induktivnost rasipanja pobudnog namotaja u toj šemi će se jednostavno interpretirati preko reaktanse (induktivnosti) rasipanja pobudnog namotaja. Induktivnost rasipanja za q osu je od manjeg interesa pošto se većina radnih stanja i stanja sa kratkim spojem može interpretirati uglavnom sa efektima d ose (pošto su struje dominantno induktivnog karaktera).

Iz (10.20) se vidi da je matrica L_B , odnosno matrica induktivnosti u Blondelovim (Parkovim) koordinatama, simetrična matrica sa puno nultih elemenata, koji su konstantni, odnosno ne zavise od ugla θ .

10.2. Parkova naponska jednačina

U cilju nalaženja analitičkih veza između napona i struja u (d, q, o) koordinatama (Parkovim koordinatama) polazi se od jednačine (10.2), napisane za pozitivne generatorske smerove. U osnovi, ove veze su posledica sledeće elementarne jednačine u fazorskoj notaciji:

$$\underline{E} = \underline{U} + \underline{ZI} \quad (10.22)$$

Primenjujući Parkovu transformaciju na 6-komponentni vektor napona dobija se:

$$\mathbf{B}^{-1} \mathbf{u}_B = -\mathbf{R} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{i}_B - \frac{d}{dt} \left\{ \mathbf{B}^{-1} \Psi_B \right\}$$

ili

$$\mathbf{u}_B = -\mathbf{R} \mathbf{i}_B - \mathbf{B} \frac{d\mathbf{B}^{-1}}{dt} \Psi_B - \frac{d}{dt} \Psi_B \quad (10.23)$$

U (10.23) uvedeno je $\mathbf{B} \mathbf{R} \mathbf{B}^{-1} = \mathbf{R}$, zatim je izvršeno množenje sa \mathbf{B} (s leve strane) i konačno, diferencirana je velika zagrada vodeći računa da se radi o izvodu proizvoda. Drugi sabirak na desnoj strani je različit od nule ako je $\frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \neq \text{const}$ (komponenta *ems* usled promene brzine), a treći sabirak postoji ako kroz namotaje teku naizmenične struje (komponenta *ems* usled transformatorskog efekta ili transformatorska *ems*). Sa $\dot{\theta}$ označen je prvi izvod ugla po vremenu, odnosno ugaona brzina. Posle sprovođenja naznačenih operacija pokazuje se da je:

$$\mathbf{u}_B = -\mathbf{R} \mathbf{i}_B - \dot{\theta} \begin{bmatrix} -\Psi_d \\ \Psi_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \Psi_B \quad (10.24)$$

Ako se pažljivije analizira realicija (10.24) uočava se raspredanje (dekuplovanje) veličina po d , q i o koordinatama. Korišćenjem ove osobine dobijaju se sledeće skalarne jednačine:

Po d osi:

$$\begin{aligned} u_d &= -R_s i_d - \dot{\theta} \Psi_q - \frac{d\Psi_d}{dt} \\ u_p &= R_p i_p + \frac{d\Psi_p}{dt} \\ u_D &= R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \end{aligned} \quad (10.25a)$$

Po q osi:

$$\begin{aligned} u_q &= -R_s i_q + \dot{\theta} \Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} \\ u_Q &= R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \end{aligned} \quad (10.25b)$$

i za nulti redosled

$$u_o = -R_o i_o - \frac{d\Psi_o}{dt} \quad (10.25c)$$

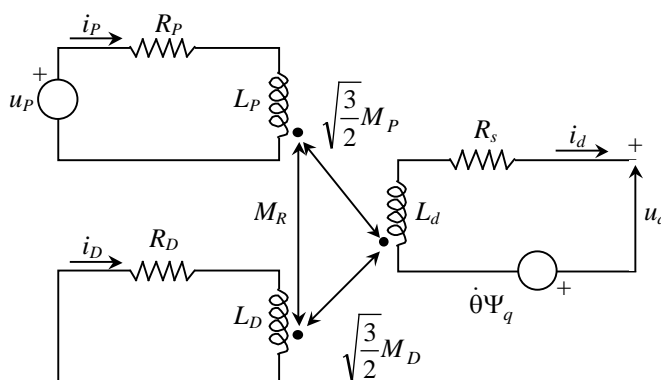
U relacijama (10.25a) i (10.25b) treba voditi računa da je $u_D = u_Q = 0$. Uočava se da bi deкупlovanje bilo perfektno kada ne bi bilo članova: $\dot{\theta} \Psi_q$ i $\dot{\theta} \Psi_d$. Međutim, deкупlovanost jednačina koje povezuju fluksne obuhvate i struje je potpuna:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_p \\ \Psi_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & \sqrt{\frac{3}{2}}M_p & \sqrt{\frac{3}{2}}M_D \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_p & L_p & M_R \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_D & M_R & L_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_p \\ i_D \end{bmatrix} \quad (10.26)$$

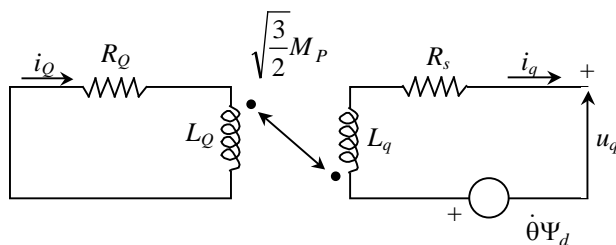
$$\begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (10.27)$$

$$\Psi_o = L_o i_o \quad (10.28)$$

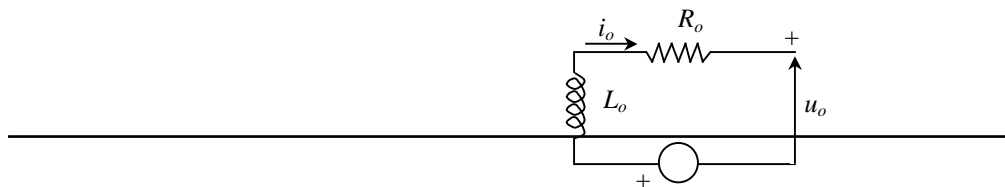
Odgovarajuće ekvivalentne šeme koje odgovaraju jednačinama (10.25), (10.26), (10.27) i (10.28) su prikazane na sl. 10.2, 10.3 i 10.4:



Sl. 10.2 Ekvivalentna šema po d-osi



Sl. 10.3 Ekvivalentna šema po q-osi



Sl. 10.4 Ekvivalentna nulta šema

Treba napomenuti da je umesto izloženog postupka svođenja moguće i svođenje rotorskih veličina na stator, što je analogno eliminisanju idealnog transformatora u odgovarajućim šemama. Ova svođenja mogu dodatno pojednostaviti ekvivalentne šeme.

Postupak za rešavanje mnogih zadataka u (d, q, o) koordinatama prati sledeći redosled. Zadatak se obično formuliše u (a, b, c) koordinatama, odnosno koordinatama faznih veličina. Zatim se izvrši transformacija u (d, q, o) koordinate i to korišćenjem relacija (10.25) ili analognih. Ako su u zadatak uključene i mehaničke promenljive tada se mora uvesti i odgovarajuća mehanička jednačina. O njoj će biti više reči kod proučavanja problema stabilnosti. Treba ukazati da ako je $\dot{\theta} = const$, tada su odgovarajuće diferencijalne jednačine linearne sa konstantnim koeficijentima i za njihovo rešavanje mogu se primeniti standardni postupci (npr. Laplasova transformacija). Na kraju proračuna se sve izračunate veličine vrata u originalne fazne koordinate.

10.3. Primer proračuna simetričnog kratkog spoja na krajevima sinhronog generatora

Kao polazni zadatak, koji je vrlo ilustrativan za razumevanje ponašanja struja kratkog spoja, proučava se trofazni kratki spoj koji se dešava na krajevima generatora. Dodatno se pretpostavlja da je generator pre nastanka kratkog spoja neopterećen (u praznom hodu), ali da je nominalno pobuđen. Kao posledica ovakvog stanja u generatoru se ima konstantna *ems* (*ems* praznog hoda) na otvorenim krajevima generatora (pre nastajanja kratkog spoja). Dakle, za $t < 0$, generator je u praznom hodu, a za $t \geq 0$ u kratkom spoju. Prema tome trenutak $t = 0$ predstavlja trenutak nastanka kratkog spoja. Pretpostavlja se da je $u_p = \text{const}$,

odnosno $i_p = \frac{u_p^0}{R_p}$ i da je ugao $\theta = \omega_0 t + \frac{\pi}{2} + \delta$ ($\delta = \text{const}$). Sa δ je obeležen ugao između fazora unutrašnje *ems* generatora i

fazora napona na krajevima generatora, odnosno to je ugao snage jer određuje aktivnu snagu koju generator predaje mreži. Ugao θ prema svom fizičkom smislu je ugao između ose rotora (direktne ose generatora) i magnetne ose faze *a*. Rezultantni fluks je zbir pobudnog fluksa i fluksa reakcije indukta (statora). Uočava se da je ugao δ nepromenljiv sa vremenom (računa se u odnosu na osu koja se vrti sinhronom brzinom), dok ugao θ narasta sa vremenom i računa se u odnosu na nepokretnu fiksnu osu u prostoru.

Dakle, zadatak je da se nađu i_a, i_b i i_c za $t \geq 0$.

$$\text{Za } t < 0 \text{ ima se } i_{a,b,c} = \mathbf{0} \Rightarrow i_{d,q,o} = \mathbf{0}.$$

$$\text{Za } t \geq 0 \text{ ima se } u_{a,b,c} = \mathbf{0} \Rightarrow u_{d,q,o} = \mathbf{0}.$$

Kako se radi o jakim induktivnim kolima modelovanim kao izvorima konstantnog napona zaključuje se da nema trenutne promene struje u takvim kolima (teorema o održanju fluksa ili o zaleđenom ili zamrznutom fluksu), odnosno

$$\frac{d\Psi^{(0)}}{dt} = L \frac{di^{(0)}}{dt} = 0. \text{ Dakle, } i_{d,q,o}(0) = \mathbf{0}.$$

Za $t \geq 0$ ima se kratki spoj na krajevima generatora, tako da jednačine (10.26) do (10.28) postaju:

$$0 = R_s i_d - \omega_o \Psi_q - \frac{d\Psi_d}{dt}$$

$$u_p^o = R_p i_p + \frac{d\Psi_p}{dt}$$

$$0 = R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt}$$

$$0 = -R_s i_q + \omega_o \Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt}$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt}$$

$$0 = R_o i_o - L_o \frac{d\Psi_o}{dt}$$

U prethodnim jednačinama ponovo je za statorske namotaje uzet indeks *s*. Jednačina za nultu struju odgovara *RL* kolu bez izvora (u pitanju je simetričan kvar), a takođe važi da je $\dot{\theta} = \omega_o$. Stacionarno stanje se dobija kada se pusti $\frac{d\Psi_d}{dt} \rightarrow 0$,

$$\frac{d\Psi_q}{dt} \rightarrow 0, \frac{d\Psi_D}{dt} \rightarrow 0, \frac{d\Psi_Q}{dt} \rightarrow 0.$$

Jedini izvor u ovakvim okolnostima ostaje napon pobudnog kola u_p^o i za slučaj sa prisutnim aktivnim otpornostima sve promenljive teže konstantnim vrednostima u stacionarnom stanju. Dakle, sa $i_D = i_Q = 0$, $i_p = \frac{u_p^o}{R_p}$ dobija se:

$$R_s i_d + \omega_o \Psi_q = 0$$

$$R_s i_q - \omega_o \Psi_d = 0$$

Kako je prema (10.25):

$$\Psi_d = L_d i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} M_p i_p \quad (i_D = 0)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (i_Q = 0)$$

to se zamenom u prethodne jednačine dobija:

$$\begin{bmatrix} R_s & \omega_o L_q \\ \omega_o L_d & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sqrt{\frac{3}{2}} \omega_o M_P \frac{u_P^o}{R_P} \end{bmatrix}$$

Pošto je *ems* praznog hoda $E_a(0) = \omega_o M_P \frac{u_P^o}{\sqrt{2} R_P}$ to se imaju eksplicitni izrazi po i_d i i_q . Ako se ovi izrazi vrata u fazne koordinate dobija se stacionarno stanje po statorskoj struji $i_a(t)$:

$$i_a(t) = \frac{\sqrt{2} |E_a(0)|}{R_s^2 + \omega_o^2 L_d L_q} \left[R_s \sin\left(\omega_o t + \frac{\pi}{2} + \delta\right) - \omega_o L_q \cos\left(\omega_o t + \frac{\pi}{2} + \delta\right) \right]$$

Ako se zanemari aktivna otpornost statorskih namotaja R_s , tada se konačno dobija:

$$i_a(t) = \frac{\sqrt{2} E_a(0)}{X_d} \sin(\omega_o t + \delta)$$

Prelazno stanje se analizira preko postavljenog sistema jednačina u kome će u cilju pojednostavljenja biti zanemareni prigušni namotaji. Ovim se umesto 5 diferencijalnih jednačina rešava sistem sa 3 jednačine, a u suštini se ima da se ovim zanemarenjem izgubi subtranzijentni period kvara. Preuređenjem ovog sistema dobija se:

$$\begin{aligned} 0 &= R_s i_d + \omega_o L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} + \sqrt{\frac{3}{2}} M_P \frac{di_P}{dt} \\ u_P^o &= R_P i_P + \sqrt{\frac{3}{2}} M_P \frac{di_d}{dt} + L_P \frac{di_P}{dt} \\ 0 &= R_s i_q - \omega_o L_d i_d - \omega_o \sqrt{\frac{3}{2}} M_P i_P + L_q \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (10.29)$$

Jedan od pogodnih načina rešavanja ovog sistema jednačina je korišćenje Laplace-ove transformacije. Ako se uvažavaju početni uslovi $i_d(0^-) = i_q(0^-) = 0$, kao i $i_P(0^-) = i_P^o = \frac{u_P^o}{R_P}$ i uvođenjem matrične notacije se ima:

$$\begin{bmatrix} R_s + sL_d & \sqrt{\frac{3}{2}} sM_P & \omega_o L_q \\ \sqrt{\frac{3}{2}} sM_P & R_P + sL_P & 0 \\ -\omega_o L_d & -\sqrt{\frac{3}{2}} \omega_o M_P & R_s + sL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(s) \\ i_P(s) \\ i_q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} M_P \\ L_P + \frac{R_P}{s} \\ 0 \end{bmatrix} i_P^o \quad (10.30)$$

Rešenja za $i_d(s)$, $i_q(s)$ i $i_P(s)$ mogu se relativno lako naći korišćenjem odgovarajućih determinanti. Tako se dobija:

$$i_d(s) = \frac{\Delta_{i_d}(s)}{\Delta(s)} = \frac{\begin{vmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} M_P & \sqrt{\frac{3}{2}} sM_P & \omega_o L_q \\ L_P + \frac{R_P}{s} & R_P + sL_P & 0 \\ 0 & -\sqrt{\frac{3}{2}} \omega_o M_P & R_s + sL_q \end{vmatrix}}{\Delta(s)} i_P^o \quad (10.31)$$

Sa $\Delta(s)$ je označena determinanta matrice iz (10.30) koja se može svesti na oblik:

$$\Delta(s) = as^3 + bs^2 + cs + d \quad (10.32)$$

gde su koeficijenti a , b , c i d :

$$\begin{aligned}
 a &= L'_d L_P L_q \\
 b &= (L'_d + L_q) L_P R_s + L_d L_q R_P \\
 c &= \omega_o^2 L'_d L_P L_q + L_P R_s^2 + (L_d + L_q) R_s R_P \\
 d &= (\omega_o^2 L_d L_q + R_s^2) R_P
 \end{aligned}
 \tag{10.33}$$

gde je:

$$L'_d = L_d - \frac{\left(\sqrt{\frac{3}{2}} M_P\right)^2}{L_P}
 \tag{10.34}$$

Sa L'_d je označena tranzijentna induktivnost po direktnoj osi, koja je uvek pozitivna i tipično iznosi $L'_d \cong 0,2L_d$.

Položaj nula polinoma (10.32) je vrlo značajan jer određuje ponašanje struja u prelaznom procesu. Prema Routh-Hurwitz-ovom kriterijumu lako se utvrđuje da su sve nule ovog polinoma u levoj poluravni, odnosno da je oscilatorni proces prigušujući (stabilan). U praksi pošto su R_s i R_P relativno male aktivne otpornosti, uzima se $R_s \approx R_P \approx 0$, tako da se (10.32) svodi na:

$$\Delta(s) = L'_d L_P L_q s(s^2 + \omega_o^2)
 \tag{10.35}$$

Prema (10.35) vidi se da su nule $s_1 = 0$; $s_{2,3} = \pm j\omega_o$ na $j\omega$ osi. Ovo pojednostavljenje ne utiče mnogo na ponašanje prelaznih procesa u prvih nekoliko perioda. U suštini se ovo pojednostavljenje svodi na činjenicu da je u rešenju diferencijalnih jednačina zanemareno prigušenje. U ovakvom pristupu dobija se:

$$\begin{aligned}
 i_d(s) &= -\frac{\sqrt{\frac{3}{2}} M_P i_P^o}{L'_d} \frac{\omega_o^2}{s(s^2 + \omega_o^2)}, \text{ odnosno} \\
 i_d(t) &= \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} M_P i_P^o}{L'_d} (\cos \omega_o t - 1)
 \end{aligned}
 \tag{10.36}$$

Modifikujući (10.36) konačno se dobija:

$$i_d(t) = \frac{\sqrt{3} E_a(0)}{X'_d} (\cos \omega_o t - 1)
 \tag{10.37}$$

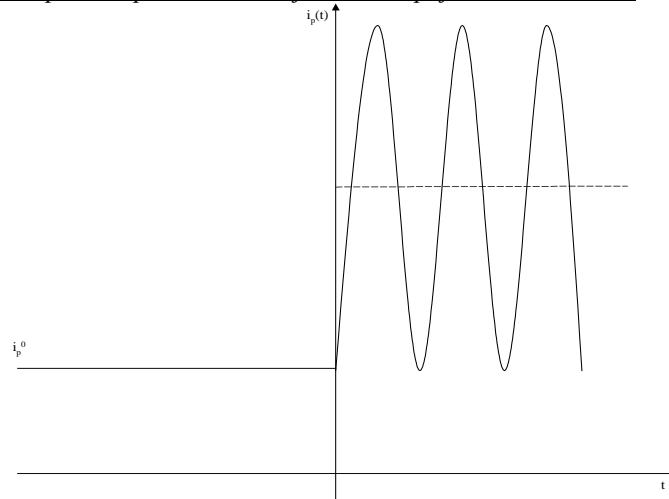
U (10.37) sa X'_d je obeležena tranzijentna reaktansa, $X'_d = \omega L'_d$, a sa $E_a(0)$ ems praznog hoda iz stanja pre nastanka kvara. Na sličan način se nalaze:

$$i_q(t) = \frac{\sqrt{3} E_a(0)}{X_q} \sin \omega_o t
 \tag{10.38}$$

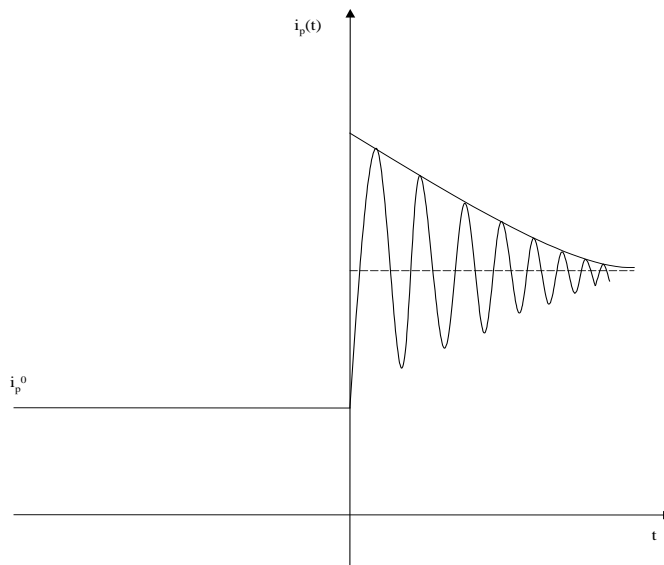
kao i:

$$i_p(t) = \left[1 + \frac{X_d - X'_d}{X'_d} (1 - \cos \omega_o t) \right] i_P^o = \left[\frac{X_d}{X'_d} - \left(\frac{X_d}{X'_d} - 1 \right) \cos \omega_o t \right] i_P^o
 \tag{10.39}$$

Iz analize vremenske promene pobudne struje sa zanemarenim aktivnim otpornostima (izraz (10.39)) se vidi da ona sadrži značajnu naizmeničnu i jednosmernu komponentu. Ova vremenska promena je prikazana na sl. 10.5a.



Sl. 10.5.a Vremenska promena pobudne struje sa zanemarenom aktivnom otpornošću



Sl. 10.5.b Vremenska promena pobudne struje sa uvaženom aktivnom otpornošću

Na sl.10.5b ilustrovan je eksperimentalno snimljen realni oscilogram vremenske promene pobudne struje, sa kojeg je očigledan uticaj uključivanja aktivne otpornosti u model.

Korišćenjem inverzne Parkove transformacije nalaze se vremenske slike faznih struja:

$$\mathbf{i}_{a,b,c} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{d,q,o} \tag{10.40}$$

Uvažavajući da je $i_o(t) \equiv 0$ (nultih komponenti struje nema u ovoj analizi) za struju faze a se dobija:

$$i_a(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[\cos\left(\omega_o t + \frac{\pi}{2} + \delta\right) \frac{\sqrt{3}E_a(0)}{X'_d} (\cos \omega_o t - 1) + \sin\left(\omega_o t + \frac{\pi}{2} + \delta\right) \frac{\sqrt{3}E_a(0)}{X_q} \sin \omega_o t \right]$$

Korišćenjem trigonometrijskih identiteta u prethodnoj relaciji moguće je razdvojiti članove sa učestanostima 0 , ω_o i $2\omega_o$.

$$i_a(t) = \frac{\sqrt{2}E_a(0)}{X'_d} \sin(\omega_o t + \delta) - \frac{E_a(0)}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{X'_d} + \frac{1}{X_q} \right] \sin \delta - \frac{E_a(0)}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right] \sin(2\omega_o t + \delta) \tag{10.41}$$

Prvi član u (10.41) je osnovni harmonik (50 Hz), drugi je jednosmerna komponenta, a treći član je član sa dvostrukom frekvencijom (100 Hz) .

Ponovo treba ukazati da je aktivna otpornost zanemarena tako da je slika realna samo u prvih nekoliko oscilacija, dok kasnije treba uvažiti i prigušenje. Struje faza b i c se naravno lako nalaze, dok je važno ukazati da promena ugla δ menja u

članovima osnovne i dvostruke frekvencije samo fazu, a u jednosmernoj komponenti menja amplitudu. Pošto je ustaljena struja kratkog spoja sa zanemarenom aktivnom otpornošću:

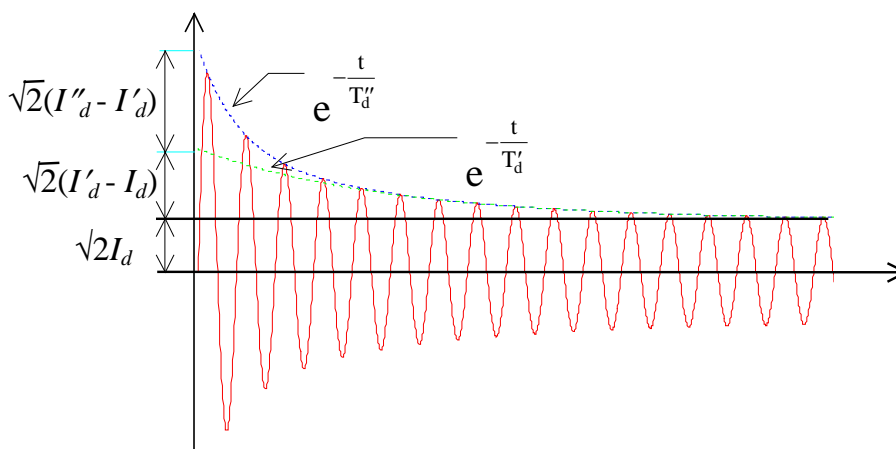
$$i_a(t) = \frac{\sqrt{2}E_a(0)}{X_d} \sin(\omega_o t + \delta) \tag{10.42}$$

to se kombinujući (10.41) i (10.42), ali sa uvažanim prigušenjem (sa uvaženom aktivnom otpornošću), dobija za tranzijentnu struju osnovnog harmonika:

$$i'_a(t) = \sqrt{2}E_a(0) \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \right] \sin(\omega_o t + \delta) \tag{10.43}$$

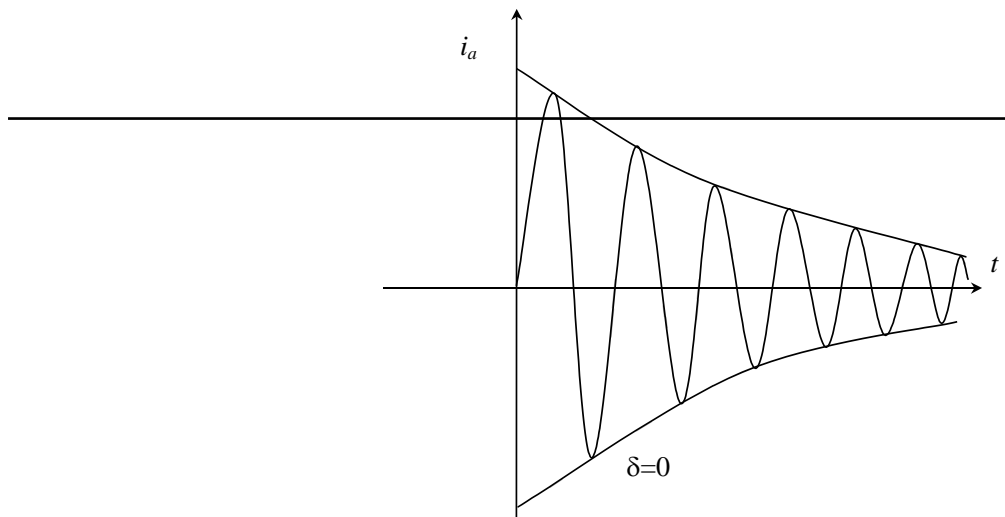
U (10.43) sa T'_d je označena tranzijentna vremenska konstanta po d osi sa statorom u kratkom spoju koja kvantitativno ponderiše prigušenje u tranzijentnom periodu.

Na sl. 10.6 prikazana je simetrična slika struje trofaznog kratkog spoja, slika bez aperiodične komponente. Pri tome je pretpostavljeno da do kratkog spoja dolazi iz praznog hoda mašine, odnosno da je radna struja pre kvara bila nula. U slučaju da je radna struja pre kvara različita od nule ona se jednostavno samo superponira na struje kratkog spoja koje se izračunaju.

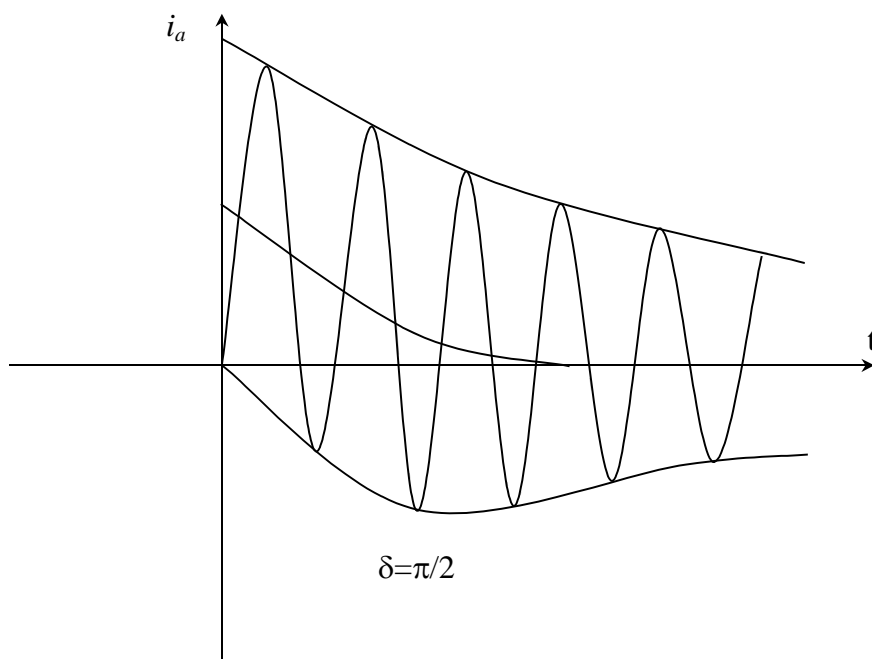


Sl. 10.6 Simetrična struja trofaznog kratkog spoja za kvar na krajevima generatora

Jasno je formalno da ako se kratki spoj desi pri $\delta = 0$, tada se u $t = 0$ ima da je jednosmerna (aperiodična) komponenta struje u fazi a jednaka nuli, sl.10.7a Fizički se tada ima slučaj da je ukupan fluksni obuhvat faze a u trenutku nastanka kratkog spoja jednak nuli i on se, prema teoremi o zamrznutom fluksu, ne može trenutno promeniti. S druge strane, ako je $\delta = \pi/2$, tada je fluksni obuhvat faze a u trenutku nastanka kratkog spoja maksimalan i jednosmerna komponenta struje u statoru je takođe maksimalna, kako bi održala taj fluks na toj vrednosti, odnosno kako bi sprečila promenu fluksa, sl. 10.7b. Ako je aktivna otpornost statora (ili proširenog statora) uključena, jednosmerna komponenta takođe opada sa dinamikom određenom jednosmernom vremenskom konstantom. Član dvostruke frekvencije takođe opada u slučaju kad je aktivna otpornost uvažena. Međutim, njegov uticaj po kvantitetu je mali i uglavnom se zanemaruje u proračunima.

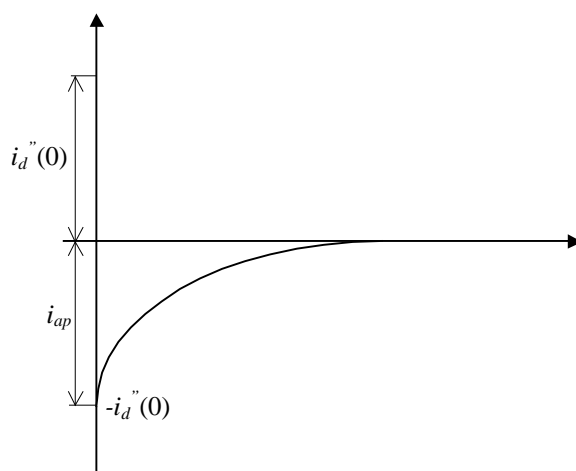


Sl.10.7a Promena struje faze a po nastanku trofaznog kratkog spoja iz stanja praznog hoda bez jednosmerne komponente



Sl. 10.7b Promena struje faze a po nastanku trofaznog kratkog spoja iz stanja praznog hoda sa jednosmernom komponentom

Dakle, pod pretpostavkom da je zarobljeni fluks u trenutku nastanka kratkog spoja različit od nule (misli se na fluks obuhvaćen statorskim namotajem faze a) on mora ostati konstantan i neposredno posle nastanka kvara. Da bi on ostao konstantan pojavljuje se aperioidična (jednosmerna) komponenta struje, i_{ap} , suprotna po polaritetu subtranzijentnoj struji kvara I''_d , sl. 10.8.



Sl. 10.8 Početna vrednost aperioidične komponente struje kratkog spoja

Jednosmerna komponenta opada sa aperioidičnom vremenskom konstantom T_a koja tipično iznosi oko 0,1 s. O vremenskim konstantama sinhronne mašine biće kasnije više reči, a za sada je bitno ukazati, zbog lakših analiza, da se sledeće tri vremenske konstante razlikuju orijentaciono za po red veličine, odnosno da važi sledeća veza: $T''_d \cong 0,01 \text{ s} < T_a \cong 0,1 \text{ s} < T'_d \cong 1 \text{ s}$.

U cilju potpunijeg objašnjenja početnih vrednosti struje kratkog spoja na krajevima sinhronog generatora korisno je razmotriti slučaj kada se izvor naizmeničnog napona priključuje na redno RL kolo. Neka je taj izvor određen promenom:

$$U_{max} \sin(\omega t + \alpha)$$

i neka se u trenutku $t = 0$ uključuje napon. Prema tome ugao α (fazni stav napona u ovoj analizi je obeležen sa α pošto je oznaka θ već iskorišćena u ovom poglavlju) određuje vrednost napona u trenutku zatvaranja kola. Vidi se da je za $\alpha = 0$ vrednost napona u trenutku zatvaranja kola nula, a da je za $\alpha = \pi/2$ maksimalna i pozitivna. Diferencijalna jednačina koja omogućava određivanje struje u vremenskom domenu je:

$$U_{max} \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt} \tag{10.44}$$

Rešenje ove jednačine je oblika:

$$i = \frac{U_{max}}{Z} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - e^{-Rt/L} \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad (10.45)$$

gde je:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \varphi = \arctg(\omega L/R)$$

Prvi sabirak u jednačini (10.45) je periodičan a drugi je aperiodičan (jednosmeran) i opada sa vremenskom konstantom L/R . Ovaj drugi sabirak određuje jednosmernu komponentu struje u ukupnoj struji po zatvaranja kola. Periodični sabirak je ustaljena struja u kolu po iščezavanju jednosmerne komponente, odnosno partikularno (prinudno) rešenje diferencijalne jednačine za zadat naizmenični priključeni napon. Ako je vrednost sabirka koji predstavlja ustaljenu komponentu struje u trenutku $t = 0$ različita od nule tada se jednosmerna komponenta mora pojaviti zbog fizičke činjenice da se struja ne može trenutno promeniti. Struja je pre zatvaranja kola bila nula i ona mora da ostane nula i neposredno posle zatvaranja kola. Treba primetiti da jednosmerne komponente nema ako je kolo zatvoreno u trenutku u kome važi $(\alpha - \varphi) = 0$ ili $(\alpha - \varphi) = \pi$. S druge strane jasno je da je jednosmerna komponenta maksimalna i jednaka maksimumu naizmenične komponente, ako je $(\alpha - \varphi) = \pm\pi/2$. Dakle, jednosmerna komponenta može da ima vrednost od 0 do U_{max}/Z u zavisnosti od trenutne vrednosti napona u trenutku zatvaranja kola i u zavisnosti od faktora snage kola (ugla φ). U trenutku zatvaranja kola jednosmerna i naizmenična komponenta uvek moraju biti iste po vrednosti a suprotne po znaku, kako bi održale struju kola na nuli (jer je struja bila nula pre zatvaranja kola).

Ovde je važno ukazati da je razlika uglova $(\alpha - \varphi)$ u prethodnim relacijama obeležena sa δ , odnosno sa uglom koji određuje snagu koju sinhroni generator predaje u mrežu. S druge strane aktivna otpornost kola koje se ima pri kratkom spoju na krajevima generatora je izuzetno mala u odnosu na reaktansu (od 50 do 100 puta manja), pa su struje gotovo čisto induktivne, odnosno ugao φ blizak $\pi/2$. Dakle, ugao δ se svodi na ugao pomenen za $\pi/2$ od ugla α . Sve se ima kao da je struja kratkog spoja gotovo induktivna. Iz tih razloga reaktanse koje su potrebne u proračunu su reaktanse po direktnoj osi.

Interesantno je fizički objasniti zašto je početna vrednost struje kratkog spoja osetno veća od ustaljene vrednosti struje kratkog spoja. U stacionarnom stanju pre kvara postojala je konstantna pobudna struja i_p^o sa konstantnim pobudnim fluksom $\Psi_p^o = L_p i_p^o$ u ovom konkretnom scenariju. Statorske struje su bile nula pošto je po pretpostavci do kratkog spoja došlo iz stanja praznog hoda mašine (otvoren stator). Po nastajanju kratkog spoja kroz statorske namotaje poteknu statorske struje koje kasne za *ems* praznog hoda za 90° . Treba podsetiti da ova *ems* kasni za pobudnim fluksom za 90° , tako da statorske struje kasne za rotorskom pobudnom strujom za 180° ($90^\circ + 90^\circ$) i prema tome one stvaraju fluks po *d* osi (ako su aktivne otpornosti zanemarene), koji je suprotstavljen osnovnom pobudnom fluksu (demagnetišuće dejstvo). Pošto Ψ_p^o mora ostati konstantno neposredno posle poremećaja, prema teoremi o konstantnosti fluksa, to pobudna struja mora bitno da poraste kako bi kompenzovala značajno demagnetišuće dejstvo velikih statorskih struja. Razlog zašto su statorske struje velike (velike u poređenju sa ustaljenim radnim strujama) je taj što je induktivnost L'_d (odnosno L''_d , ako se uvažava i prigušni namotaji) osetno manja od induktivnosti ustaljenog stanja L_d . Induktivnost L'_d je zato manja jer se u početnim trenucima fluks zatvara putevima veće magnetne otpornosti (putevima kojima dakle odgovaraju manje induktivnosti).

10.4. Reaktanse sinhronih generatora

Sinhrona mašina ima jednu nultu i jednu inverznu, ali nekoliko direktnih reaktansi u različitim vremenskim trenucima, odnosno u subtranzijentnom, tranzijentnom i ustaljenom periodu kvara.

Sinhrona reaktansa po direktnoj osi:

Ova reaktansa se izračunava u stacionarnim stanjima kao:

$$X_d = \omega L_d \quad (10.46)$$

Sinhrona reaktansa je reprezent mašine u stacionarnom stanju, pri normalnim uslovima rada. Struje direktnog redosleda koje teku kroz namotaje faza *a, b* i *c* proizvode obrtno magnetno polje u vazдушnom procepu (formalno izvođenje za obrtno magnetno polje biće prikazano pri kraju ovog poglavlja). Pri tome se proizvodi spektar harmonika (ne samo idealni sinusni talas), ali je osnovni harmonik dominantan i od najvećeg interesa. Ovo obrtno polje i rotor koji se vrti sinhronom brzinom su u relativnom mirovanju. Pretpostavlja se da je rotor pri definisanju sinhrona reaktanse nepobuden. Magnetopobudna sila (*m_{ps}*) statora ne zavisi od pozicije rotora, jer je ona proizvod struje i broja navojaka. Nasuprot tome, fluks koji je posledica ove *m_{ps}*, kod hidrogenatora (kod turbogeneratora sa cilindričnim rotorom veoma malo) bitno zavisi od pozicije rotora, zbog različitih magnetnih otpornosti puteva po kojima se zatvara.

Prvi karakteristični položaj je onaj u kojem je direktna osa rotora poravnata sa maksimumom rezultantne *m_{ps}* statora. U toj poziciji fluks se zatvara putevima visoke magnetne provodnosti. Kao posledica sledi da osnovni harmonik fluksa ima maksimalnu vrednost. U ovoj poziciji reaktansa sinhrona mašine je maksimalna i to je sinhrona reaktansa po *d* osi. Matematički se naravno, induktivnost računa kao količnik ovog najvećeg fluksa i struje koja ga je proizvela Ψ/i .

Pošto se ima relativno mirovanje obrtnog polja u odnosu na rotor, to nije bitno da li je pobudni namotaj otvoren ili zatvoren, odnosno nije od značaja da li je rotor pobuden ili nepobuden pri ovom eksperimentu. Kao posledica postojanja ovog (vremenski) promenljivog magnetnog polja javlja se indukovana *ems* u statorskom namotaju:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (10.47)$$

Sinhrona reaktansa se može meriti na sledeći način: na statorske namotaje priključi se trofazni naizmenični izvor direktnog redosleda, rotor se obrće sinhronom brzinom i u poziciji u kojoj je d osa rotora poravnata sa maksimumom obrtne mps statora izmere se napon i struja sa statorske strane. Količnik te dve veličine je sinhrona reaktansa X_d .

Sinhrona reaktansa po poprečnoj osi:

Iz prethodnog razmatranja može se zaključiti da je fluks najmanji kada se q osa podudara sa maksimumom talasa mps statora, posebno kod generatora sa istaknutim polovima. U tim okolnostima linije fluksa se zatvaraju putevima osetno manje magnetne provodnosti. Količnik ovakvog fluksnog obuhvata (koji se zatvara putevima male magnetne provodnosti) i odgovarajuće struje statora, daje sinhronu reaktansu po q osi. Kod idealnog turbogeneratora (sa besprekorno cilindričnim rotorom) sinhronu reaktansu po obe ose su jednake, $X_d = X_q$.

U principu se sinhrona reaktansa po poprečnoj osi meri na analogan način kao i sinhrona reaktansa po direktnoj osi, s tim što se struja i napon očitavaju u trenutku kad je poprečna osa poravnata sa maksimumom mps statora. Zbog prisustva reluktantnog momenta zaključuje se da je teže meriti sinhronu reaktansu po poprečnoj osi.

Sinhrona reaktansa po podužnoj osi kod hidrogeneratora iznosi oko 120%, a po poprečnoj osi oko 80%. Sinhrona reaktansa turbogeneratora je veća i iznosi od 160% do 250%, za najveće turbogeneratore.

Tranzijentna reaktansa po direktnoj osi:

Uslovi za definisanje ove reaktanse su identični kao i uslovi za definisanje sinhronu reaktansu po d osi, samo se ovde umesto stacionarnih (ustaljenih) struja u namotajima statora, operiše sa trenutno (naglo) dovedenim strujama sa statorske strane. Direktnu ems se mere neposredno po nastanku ove promene.

Prilikom eksperimenta, pri kome se ustanovljava tranzijentna reaktansa po d osi, rotor se okreće sinhronom brzinom i ponovo se nalazi trenutak u kome se d osa poklapa sa maksimumom rezultantne obrtne mps generisane naglom eksitacijom sa statorske strane (kratkim spojem). Pobudni namotaj je zatvoren, ali nepobuđen (kroz njega ne teku struje pre ovog eksperimenta). Trenutna pojava struje u statorskim namotajima ima za posledicu nastajanje mps koja teži da proizvede fluks po osi pola rotora.

Pošto prema teoremi o konstantnosti fluksa ukupni fluks rotora mora da se održi na nuli (jer je i pre eksperimenta bio nula), to se u rotoru pojavljuju indukovane struje koje oponiraju uzroku (naglo priključenim statorskim strujama koje pokušavaju da proizvedu fluks po direktnoj osi). Jedini fluks koji se trenutno može uspostaviti, posle naglog priključenja struja na statorske namotaje, je onaj koji prolazi putevima manje magnetne provodnosti. Taj fluks je mali pa je iz tih razloga $X'_d < X_d$. Naravno, tranzijentna reaktansa po direktnoj osi se računa kao:

$$X'_d = \omega L'_d \quad (10.48)$$

U ovim okolnostima sinhrona mašina je analogna transformatoru sa sekundarom, odnosno sa rotorom, u kratkom spoju i sa jednosmernom strujom trenutno priključenom na stator. Po ovoj analogiji za proračun tranzijentne reaktanse moguće je, dakle, da se iskoristi efekat transformatora sa sekundarem u kratkom spoju. Tranzijentna reaktansa sa sekundarem u kratkom spoju iznosi svega od 20÷30% i manja je kod turbogeneratora nego kod hidrogeneratora.

Na osnovu prethodnih razmatranja zaključuje se da je ustaljena vrednost struje kratkog spoja ograničena sa sinhronom reaktansom, dok je tranzijentna vrednost struje kratkog spoja ograničena tranzijentnom reaktansom. Tranzijentna reaktansa je osetno manja pa je i tranzijentna struja iz tog razloga bitno veća. Kako vreme posle nastanka kratkog spoja odmiče, vrednost reaktanse će se povećavati a time će se i struja kratkog spoja eksponencijalno smanjivati, kao što je već proračunima pokazano u ovom poglavlju.

Subtranzijentna reaktansa po direktnoj osi:

Kod analize tranzijentne reaktanse po direktnoj osi pretpostavljeno je da na rotoru nema prigušnih namotaja. U realnim uslovima prigušni namotaji su prisutni i ponašaju se slično kao pobudni, naime u njima se javljaju indukovane struje koje stvaraju flukseve koji su u opoziciji uzročnim fluksevima (koji su posledica naglog priključenja struja direktnog redosleda na statorske namotaje). Ovi oponentni fluksevi, prema teoremi o zamrznutom fluksu, nastoje da održe rezultantni fluks u pobudnom i prigušnim namotajima na nuli (pošto su ovi fluksevi i pre eksperimenta bili nula i ne mogu se naglo promeniti). Konstruktivno su prigušni namotaji bliži vazdušnom procepu od pobudnog namotaja. Posledica ovoga je da se u subtranzijentnom periodu fluksevi zatvaraju putevima još manje magnetne provodnosti pa je iz tih razloga: $X''_d < X'_d$.

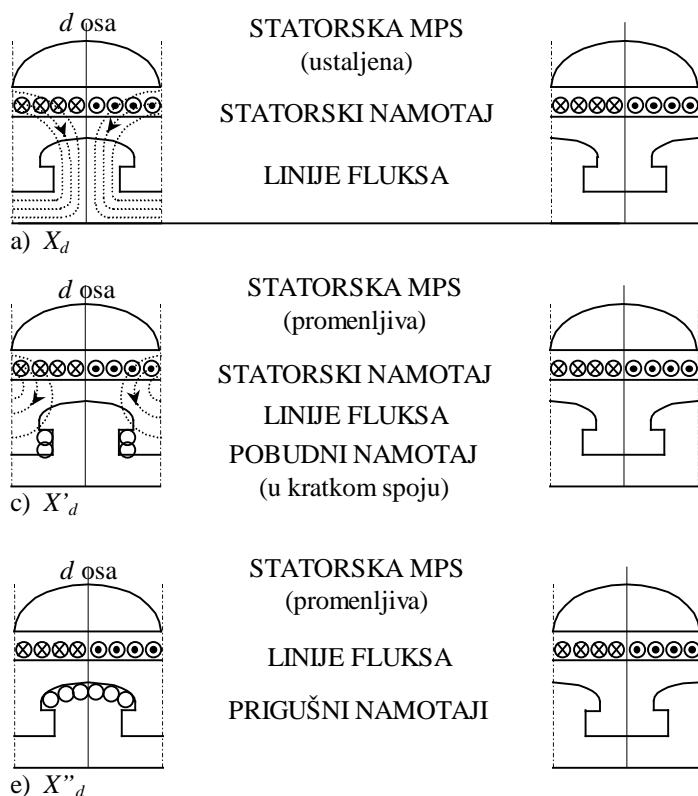
Subtranzijentni period je veoma kratki zbog izraženog efekta aktivne otpornosti prigušnih namotaja. Naime, konstruktivno se prigušni namotaji upravo tako izvode da njihova aktivna otpornost bude što uticajnije, kako bi prigušila prelazne procese što efektivnije.

Subtranzijentna i tranzijentna reaktansa po poprečnoj osi:

Rezoni prema kojima se definišu ove reaktanse su identični kao kod definisanja subtranzijentne i tranzijentne reaktanse po direktnoj osi, s tom razlikom što se, u ovim eksperimentima, poprečna osa poklapa sa maksimumom mps statora. Ova mps

statora je posledica naglog priključenja struja direktnog redosleda na trofazni statorski namotaj. S obzirom da su putevi za zatvaranje flukseva (kod generatora sa istaknutim polovima), u normalnom radnom stanju i u stanju neposredno po naglom priključenju statorskih struja isti, to se zaključuje da nema razlike između tranzijentne reaktanse i sinhronne reaktanse po poprečnoj osi kod hidrogenatora. Dakle, ima se da je: $x'_q = x_q$. Pošto se struje u pobudnom namotaju indukuju usled uzročnog fluksa po direktnoj osi (a ne usled onog po poprečnoj osi) to se zaključuje da je: $x'_d < x'_q$. Prigušni namotaji potiskuju fluks po poprečnoj osi u početnim trenucima još dalje prema putevima sa manjom magnetnom provodnošću, tako da je $x''_q \ll x'_q$. Kod hidrogenatora bez amortizatora poprečne reaktanse ustaljenog, tranzijentnog i subtranzijentnog perioda su međusobno jednake.

Kod generatora sa cilindričnim rotorom promene reaktansi po poprečnoj osi usled indukovanih vrtložnih struja po poprečnoj osi rotora, aproksimiraju se sa dve obvojnice koje definišu subtranzijentnu i tranzijentnu reaktansu po poprečnoj osi. Pokazuje se da je subtranzijentna reaktansa kod ovih generatora samo nešto manja od tranzijentne. Pored toga, pokazuje se da je tranzijentna reaktansa negde između ustaljene reaktanse po poprečnoj osi i tranzijentne reaktanse po direktnoj osi.



Sl. 10.9. Linije fluksa u različitim trenucima kratkog spoja

Inverzna reaktansa:

Prilikom definisanja inverzne reaktanse pretpostavlja se sledeći scenario. Rotor se obrće sinhronom brzinom i pobudni namotaj je pri tome nepobuđen ali kratko spojen. Na statorske namotaje je priključen inverzni trofazni izvor. Rezultat priključenja inverznog trofaznog sistema je egzistencija inverznog obrtnog polja. Sa rotora se ova rezultatna mps vidi sa dvostrukom frekvencijom. Struje ove dvostruke frekvencije se indukuju u rotoru i one teže da, prema teoremi o konstantnom fluksu, održe rotorske flukseve na nuli (jer su oni i bili nula pre eksperimenta). Fluks kojeg proizvode statorske struje je prinuđen da se u ovakvim uslovima zatvara putevima male magnetne provodnosti koji se ne obuhvataju sa rotorskim kolima. Ovi putevi su isti kao i u slučaju subtranzijentnih reaktansi. Kao rezultat se dobija inverzna reaktansa sinhronne mašine. Pošto pri ovom eksperimentu mps nailazi alternativno na direktnu i na poprečnu osu sa dvostrukom sinhronom brzinom, zaključuje se da se inverzna reaktansa mašine nalazi negde između subtranzijentnih reaktansi po direktnoj i poprečnoj osi. Ona se obično računa kao aritmetička sredina ovih dveju reaktansi:

$$X_i = \frac{X'_d + X'_q}{2} \tag{10.49}$$

Nulta reaktansa:

Po priključenju nultih struja na namotaje statora (za ove potrebe može se iskoristiti monofazni naizmenični izvor sa tri statorska namotaja odvojena u zvezdištu i spregnuta redno) ne javlja se rezultatno obrtno polje u međugvožđu. U ovakvim okolnostima ima se samo pulsirajuće polje koje se ne hvata u korak (ne zakačinje) sa rotorom. To ima za posledicu male flukseve, pa sledi da su i nulte reaktanse male i gotovo da nisu uslovljene brzinom obrtanja rotora. Mps i fluksu koji se javljaju kao

posledica nultih struja na statoru, je suprotstavljen fluks od struja u bliskim rotorskim kolima. Iz tih razloga proizvodi se vrlo malo fluksa i nulte reaktanse su po pravilu najmanje: $X_0 < X''_d$. Nulte reaktanse su beskonačno velike ako je zvezdište statorskih namota izolovano.

Eksperimentalno nalaženje nulte reaktanse može se realizovati tako da se namotaji statora povežu redno i da se na njih priključi monofazni izvor struje. Količnik napona i struje izmerenih u takvim okolnostima je nulta reaktansa.

10.5. Vremenske konstante sinhronne mašine

U toku prelaznih procesa u sinhronom generatoru oblici struja i napona se menjaju u skladu sa jednom ili više vremenskih konstanti. Notacija koja će biti korišćena kod uvođenja vremenskih konstanti sinhronih generatora je u skladu sa prethodnim oznakama tako da se *superskript sekundum* odnosi na subtranzijentni period, *superskript prim* na tranzijentni, *indeks d* na direktnu osu, *indeks q* na poprečnu osu i da se dodatno koristi *indeks 0*. Ovaj poslednji indeks se pridružuje veličinama koje se imaju pri eksperimentima sa statorom u praznom hodu, a ako su veličine bez ovog indeksa, tada je time ukazano da je reč o eksperimentima sa statorom u kratkom spoju.

Prema tome vremenska konstanta T'_{d0} predstavlja tranzijentnu vremensku konstantu po direktnoj osi sa statorom u praznom hodu. Eksperiment pri kome se određuje ova konstanta podrazumeva da je stator u praznom hodu i da je prigušni namotaj bez uticaja (može se pretpostaviti da on ne postoji). Promene, odnosno dinamika kojom se menja pobudna struja u rotorskom namotaju usled manipulacija u tom istom pobudnom kolu su određene sa ovom vremenskom konstantom (koja se određuje kao za bilo koje R-L kolo):

$$T'_{d0} = \frac{L_p}{R_p} \quad (10.50)$$

U (10.50) sa L_p je označena sopstvena induktivnost pobudnog namotaja, a sa R_p aktivna otpornost pobudnog namotaja.

Ovo je najveća vremenska konstanta i njena tipična vrednost je oko 6 s. U principu se kreće u granicama od 2÷11 s.

Pošto su statorske *ems*, u slučaju kad je stator u praznom hodu, uslovljene isključivo promenama pobudne struje, to se zaključuje da je oblik i dinamika *ems* praznog hoda takođe uslovljena sa ovom istom vremenskom konstantom.

Nadalje, u skladu sa usvojenom notacijom, T'_d predstavlja tranzijentnu vremensku konstantu po direktnoj osi sa statorom u kratkom spoju. Eksperiment pri kome se određuje ova vremenska konstanta zahteva da su i pobudni namotaj i namotaj statora zatvoreni. U takvim okolnostima je očevidna interakcija između ova dva namotaja. Jednosmerna struja na rotoru, zbog rotacije, indukuje naizmenične struje u statoru. (Pod pretpostavkom da se imaju jednosmerne struje na statoru, indukovale bi se naizmenične struje u rotorskom pobudnom kolu). Vremenska konstanta koja određuje promene pobudne struje i promenu amplitude (obvojnici) naizmeničnih struja u statorskim namotajima je upravo T'_d . Odnos reaktanse sa pobudnim namotajem u kratkom spoju i reaktanse sa pobudnim namotajem u praznom hodu za trenutno priključene statorske struje ($\frac{X'_d}{X_d}$) je jednak odnosu vremenskih konstanti sa statorom u praznom hodu i sa statorom u kratkom spoju, odnosno ima se:

$$T'_d = T'_{d0} \frac{X'_d}{X_d} \quad (10.51)$$

Razlog zašto je $T'_d < T'_{d0}$ je identičan kao i razlog zašto je reaktansa transformatora u kratkom spoju mnogo manja od reaktanse transformatora u praznom hodu.

Tranzijentna vremenska konstanta po direktnoj osi sa statorom u kratkom spoju T'_d tipično je oko jedne četvrtine od vrednosti vremenske konstante T'_{d0} . Dakle, ona iznosi oko 1,5 s.

Dakle, T'_{d0} i T'_d su dve ekstremne vrednosti vremenskih konstanti. Za generator sa određenim opterećenjem vremenska konstanta će biti negde između ove dve ekstremne vrednosti.

Aperiodična vremenska konstanta T_a određuje brzinu promene jednosmerne struje u statorskim namotajima, ili oblik obvojnice naizmeničnih struja u pobudnom namotaju. Dakle, ona određuje fizičku vezu jednosmernih struja u statorskim namotajima i naizmeničnih struja u pobudnom namotaju. Ona je jednaka količniku statorske induktivnosti i statorske aktivne otpornosti pod specificiranim uslovima. Za određivanje statorske induktivnosti treba ukazati da ova situacija, sa naizmeničnom strujom frekvencije f u pobudnom kolu, je analogna situaciji sa inverznim strujama na statorskoj strani koje proizvode pobudne struje učestanosti $2f$. U oba slučaja reč je uglavnom o rasutom fluksu. Dakle, induktivnost preko koje se definiše ova vremenska konstanta je inverzna induktivnost statora. Razlog je što se fluksevi od jednosmernih struja statora zatvaraju putevima visoke magnetne otpornosti koji su veoma približni putevima kojima se zatvaraju inverzni fluksevi:

$$T_a = \frac{X_i}{\omega R_s} \quad (10.52)$$

Tipične vrednosti ove vremenske konstante su od 0,1s do 0,15 s za kratke spojeve na krajevima generatora.

Subtranzijentne vremenske konstante po direktnoj osi sa statorom u praznom hodu i kratkom spoju su T''_{d0} i T''_d respektivno. Ove vremenske konstante su posledica postojanja prigušnih namotaja koji sa svoje strane čine dodatno magnetno spregnuto kolo. Prigušni namotaji su po prirodi stvari sa relativno velikim aktivnim otpornostima i struje koje se u njima indukuju

možu da budu velike ali brzo opadaju ka nuli. Tipična vrednost za T''_{d0} iznosi oko 0,04 s (2 periode), dok je tipična vrednost za T''_d oko 0,01 s.

Vremenske konstante po poprečnoj osi

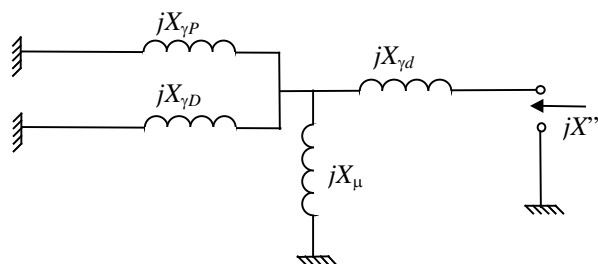
Na sličan način kako je urađeno za vremenske konstante po direktnoj osi mogu se identifikovati i vremenske konstante po poprečnoj osi sa napomenom da pobudnog namotaja nema po poprečnoj osi. Važno je isto tako ukazati na razliku između generatora sa istaknutim polovima i generatora sa cilindričnim rotorom u vezi sa vremenskom konstantom T'_q . Ova vremenska konstanta nema smisla da se definiše kod generatora sa istaknutim polovima jer nema pobudnog namotaja po poprečnoj osi, dok je T''_q u slučaju generatora sa istaknutim polovima i sa prigušnim namotajima, približno jednaka vremenskoj konstanti T''_d . Kod generatora sa cilindričnim rotorom fluks po poprečnoj osi nailazi na puteve sa većom magnetnom provodnošću, nego u slučaju sa rotorom sa istaknutim polovima, i struje se uspostavljaju u gvožđu rotora i opadaju sa vremenskim konstantama uslovljenim sa iznosima impedansi pojedinih puteva. Obično se pretpostavlja da struje u namotajima statora mogu da se aproksimiraju sa dve eksponencijalne opadajuće funkcije, jedna sa vremenskim konstantama T'_{q0} (tranzijentna vremenska konstanta po poprečnoj osi sa statorom u praznom hodu) i T'_q (tranzijentna vremenska konstanta po poprečnoj osi sa statorom u kratkom spoju), koje odgovaraju reaktansi $X'_{q'}$, i druga sa vremenskim konstantama T''_{q0} (subtranzijentna vremenska konstanta po poprečnoj osi sa statorom u praznom hodu) i T''_q (subtranzijentna vremenska konstanta po poprečnoj osi sa statorom u kratkom spoju), koje odgovaraju reaktansi $X''_{q'}$. Tipične vrednosti su $T''_q = T''_d = 0,04$ s i $T'_q = 0,8$ s.

10.6. Interpretacija reaktansi sinhronne mašine pri proračunu struja kratkog spoja preko Tevenenove teoreme i superpozicije stanja

U skladu sa principom superpozicije, prilike u generatoru moguće je analitički interpretirati za vreme trajanja kvara na isti način kao što je to bio slučaj sa kvarovima na statičkim elementima. Prema tome kratki spoj na krajevima generatora simulira se sa dve *ems* u opoziciji. Jedna od ovih *ems* drži ravnotežu stanju pre kvara i time je simuliran radni režim. Druga *ems* deluje na pasivne reaktanse i proizvodi *promene* struja za vreme trajanja kvara. Superpozicijom ova dva stanja dobija se rezultatno stanje za vreme trajanja kvara. Promene struja, tj. dodatne struje, teku kroz namotaje statora i formiraju obrtno magnetno polje, čija je brzina sinhrona, pa je ono u relativnom mirovanju u odnosu na rotor.

Ako se pretpostavi da je na krajevima mašine simetričan kvar i da se u ovim analizama brzina rotora ne menja, tj. da je ona približno jednaka sinhronoj, i s obzirom na činjenicu da se tada ima relativno mirovanje obrtnog magnetnog polja u odnosu na rotor, rezultatna slika, koja se tada ima, je transformatorska, a struje koje se u tim okolnostima indukuju prema tome su transformatorske. Naime u ovakvim uslovima transformatorsko dejstvo se ispoljava u svim namotajima mašine. Imajući u vidu da se u sinhronom generatoru u osnovi imaju statorski namotaj i dva rotorska namotaja (pobudni i prigušni) zaključuje se da se odgovarajuća šema sinhronne mašine transformatorskog tipa može interpretirati preko šeme tronamotajnog transformatora.

Jednostavnom inženjerskom procenom, prema sl. 10.10, zaključuje se da je ulazna impedansa sinhronne mašine u subtranzijentnom periodu reda 12%. Slične procese, odnosno sličnu sliku, moguće je formirati za poprečnu osu mašine koja je od interesa kad struje kvara nisu čisto induktivnog karaktera.



Sl. 10.10 Transformatorska šema sinhronog generatora u subtranzijentnom periodu

Oznake na sl.10.10, 10.11 i 10.12 imaju sledeće značenja:

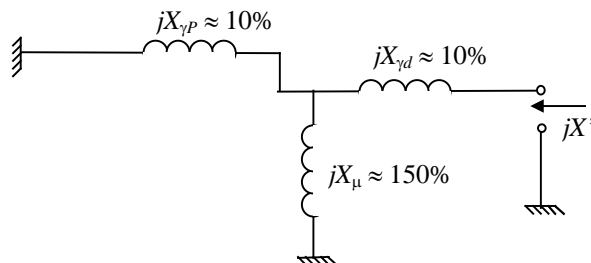
$X_{\gamma d}$ - reaktansa rasipanja statorskog namotaja po d osi (tipična vrednost oko 10%)

$X_{\gamma P}$ - reaktansa rasipanja pobudnog namotaja po d osi (tipična vrednost oko 10%)

$X_{\gamma D}$ - reaktansa rasipanja prigušnog namotaja po d osi (tipična vrednost oko 10%)

X_{μ} - reaktansa magnećenja, odnosno međusobna reaktansa između statorskih namotaja i pobudnog namotaja (tipične vrednosti su oko 100% za hidrogeneratore, dok je za turbogeneratore veća i iznosi i preko 150%).

U praksi su struje kvara gotovo čisto induktivnog karaktera pa se efekti q ose mogu zanemariti. Za prigušni namotaj (amortizator) karakteristično je da je odnos L/R niži nego kod ostalih namotaja sinhronne mašine (pobudnog i statorskog). Dakle, kod prigušnog namotaja aktivna otpornost je vrlo uticajna pa sledi da će se prelazni procesi u prigušnom namotaju relativno brzo smiriti. Potrebno je od 3 do 5 subtranzijentnih vremenskih konstanti po direktnoj osi (sa statorom u kratkom spoju) T''_d da bi se umirili procesi u prigušnom namotaju. Pošto je tipična vrednost ove vremenske konstante $T''_d=0,01$ s, to se zaključuje da subtranzijentni period traje do 0,05 s.

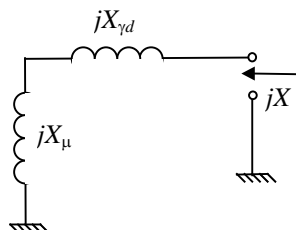


Sl. 10.11 Transformatorska šema sinhronog generatora u tranzijentnom periodu

Po završetku prelaznog procesa u prigušnom namotaju u ekvivalentnoj šemi ostaju od uticaja samo pobudni i statorski namotaji. Prema tome ekvivalentna šema tranzijentnog perioda koji nastupa neposredno po iščezavanju subtranzijentnog je ona na sl. 10.11. Ekvivalentna ulazna reaktansa je tranzijentna reaktansa i lako se, za date numeričke vrednosti, procenjuje da ona iznosi između 20-30%. Naravno po logici stvari se ima $X' > X''$.

Posle $3 \div 5 T'_d$ iščezavaju procesi u pobudnom namotaju. Kako je tranzijentna vremenska konstanta po direktnoj osi (sa statorom u kratkom spoju) T'_d reda oko 1s to se zaključuje da će tranzijentni period da traje oko 5 s. Po iščezavanju prelaznih procesa u pobudnom namotaju dolazi do ustaljenog perioda kvara, sl. 10.12. Ulazna reaktansa je sinhrona reaktansa mašine po direktnoj osi.

$$X \equiv X_d = X_{\gamma d} + X_{\mu}$$

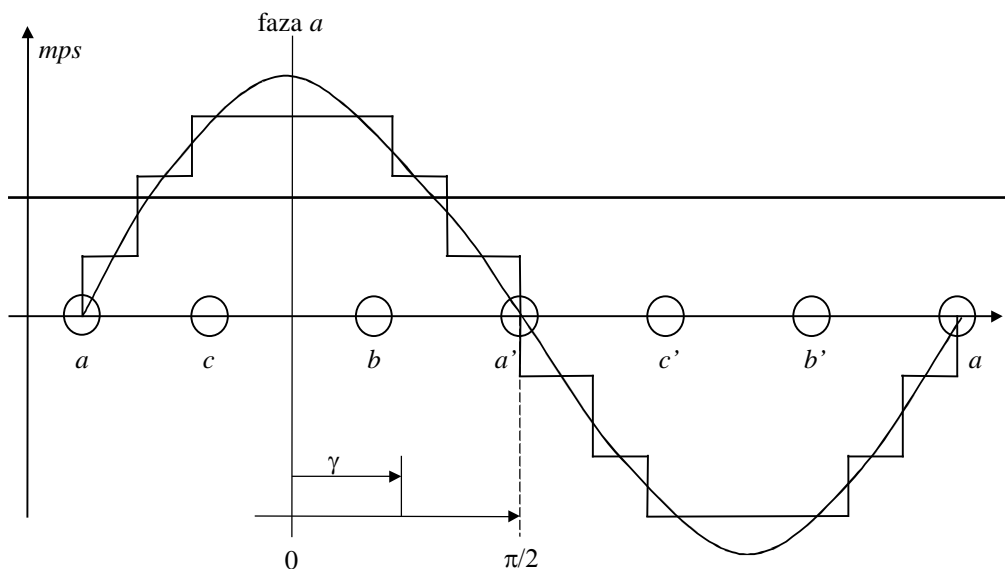


Sl. 10.12 Transformatorska šema sinhronog generatora u ustaljenom periodu

Prethodna analiza je još jednom pokazala da se sinhrona mašina na različite načine odziva u raznim trenucima trajanja kvara, odnosno da se gledano sa statorskih krajeva ima efekat impedanse (reaktanse) promenljive sa vremenom. Komponente struja iz tog razloga imaju opadajući karakter. Ukupna struja kvara se kao i u prethodnim analizama kratkih spojeva, može interpretirati kao zbir radne struje i *promene* struje. Naravno, ako je do kratkog spoja došlo iz praznog hoda sinhronog generatora tada će ukupna struja kvara biti jednaka samo izračunatoj *promeni* struje.

10.7. Obrtno magnetno polje

Magnetopobudna sila (*m_{ps}*) usled dejstva struja u tri statorska namotaja (statorska *m_{ps}*) je ilustrovana na sl. 10.13, na kojoj je apscisa obod statora koji je razvijen po horizontalnoj osi.



Sl.10.13 Prostorni talas *m_{ps}* statora za fazu *a*

Prostorni talas *m_{ps}* na sl. 10.13 je zamenjen samo osnovnim harmonikom, mada je u realnosti on stepenaste forme. Za slučaj samo jednog statorskog navojka ovaj talas bi bio kvadratne forme i povećanjem broja navojaka na statoru oblik talasa se približava sinusnoj formi. Konstrukcijom namotaja i oblika statorskog magnetnog kola može se udeo harmonika svesti na malu meru, tako da se za potrebe narednih analiza s pravom može prostorni talas *m_{ps}* faze *a* zameniti kosinusoidom baš kao i prostorni talasi faza *b* i *c*:

$$\begin{aligned} F_a &= Ni_a = ki_a \cos \gamma \\ F_b &= Ni_b = ki_b \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ F_c &= Ni_c = ki_c \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \tag{10.53}$$

Ugao γ je ugao po periferiji statora i meri se u odnosu na magnetnu osu faze *a*, dok je *k* konstanta, a *i_a*, *i_b* i *i_c* su trenutne vrednosti struja. Svaki od tri fazna namotaja na statoru proizvodi stacionarnu *m_{ps}* (stacionarni talas) sa amplitudom koja se menja u skladu sa promenom amplitude odgovarajuće struje. Ove tri *m_{ps}* su prostorno pomerene jedna u odnosu na drugu za po 120 električnih stepeni.

Za simetrični trofazni sistem statorskih struja i sa trenutkom $t = 0$ odabranim tako da je tada struja faze *a* maksimalna, ima se:

$$\begin{aligned} i_a &= I_m \cos \omega_s t \\ i_b &= I_m \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c &= I_m \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \tag{10.54}$$

gde je $\omega_s = 2\pi f$ kružna (ugaona) učestanost statorskih struja u električnim rad/s.

Sumarna *m_{ps}* usled delovanja tri pojedinačne *m_{ps}* je:

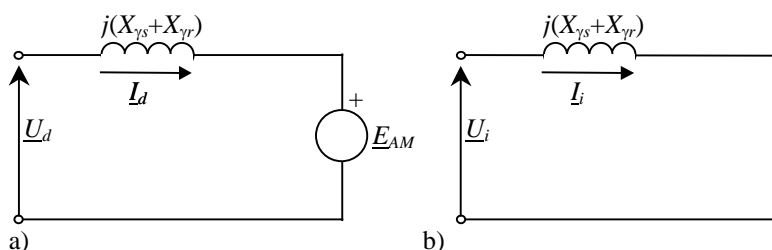
$$\begin{aligned} F_\Sigma &= F_a + F_b + F_c = \\ &= kI_m \left[\cos \omega_s t \cos \gamma + \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \right. \\ &\quad \left. + \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \right] = \frac{3}{2} kI_m \cos(\gamma - \omega_s t) \end{aligned} \tag{10.55}$$

Ovo je jednačina koja opisuje putujući talas, odnosno obrtno magnetno polje. U bilo kom momentu rezultantna *m_{ps}* ima (ko)sinusoidalnu prostornu raspodelu sa konstantnom amplitudom i faznim prostornim uglom $\omega_s t$ koji je funkcija vremena. Dakle, rezultantni talas *m_{ps}* rotira sa konstantnom ugaonom brzinom ω_s (el.rad/s).

10.8. Modelovanje asinhronih motora i potrošačkog područja kao elemenata EES za potrebe proračuna struja kratkih spojeva

Suštinska razlika između asinhronog motora i sinhronog generatora u slučaju kad se na njihovim krajevima desi kratki spoj je u načinu njihovog pobuđivanja. Dok sinhroni generator ostaje i posle kratkog spoja pobuđen rotorskom jednosmernom strujom, koja nije praktično promenjena posle kratkog spoja, dotle asinhroni motor gubi svoju pobudu jer biva odsečen od mreže koja se za njega pre toga ponašala kao izvor napajanja. Ako se desi trofazni kratki spoj na krajevima asinhronog motora tada se ima slučaj kompletno izgubljene pobude. Dakle, ako se pretpostavi da je asinhroni motor direktno vezan na neke sabirnice i da iz nekih razloga dođe do pojave trofaznog kratkog spoja neposredno na sabirnicama sa kojih se vrši napajanje, sledi da je napon na sabirnicama, posle nastanka kvara, jednak nuli.

Teorema o konstantnosti (zaleđenosti) fluksa kazuje da je u induktivnim kolima inerciona veličina struja, odnosno korespondentni fluks. Iz tog razloga se može smatrati da u prvih nekoliko trenutaka posle poremećaja, fluks ostaje konstantan u jakim induktivnim kolima kakva su namotaji asinhronih motora. Asinhroni motor je pre nastanka kratkog spoja bio potrošač na posmatranim sabirnicama. Preostala pobuda motora će prinuditi struje da teku u mesto kvara i sada će asinhroni motor da napaja mesto kvara. Pošto je fluks u međugvožđu konstantan to se i odgovarajuća *ems* ne menja i ova *ems* napaja mesto kvara.



Sl. 10.14 Ekvivalentna šema asinhronog motora u subtranzijentnom periodu a) za direktan sistem i b) za inverzan sistem

Asinhroni motor u osnovi ima dva namotaja: rotorski i statorski (prigušni namotaji se zanemaruju). Kratki spoj na krajevima motora eliminiše pobuđivanje (eksitaciju) motora i njegovo polje u međugvožđu brzo (za 2 do 3 periode) opada na nulu. Ovo je posledica tipičnih odnosa parametara motora. Naime, zbirna reaktansa rasipanja asinhronog motora se kreće od 12% do 18% (veća je za veće motore), a aktivna otpornost rotora R_r je tipično oko 3%. Asinhroni motor se u prvim trenucima posle nastanka kvara može približno aproksimirati zbirnom reaktansom rasipanja, baš kao i sinhroni generator bez prigušnog namotaja: $X''_{AM} \approx X_{\gamma s} + X_{\gamma r}$ gde je X''_{AM} subtranzijentna reaktansa asinhronog motora. Ekvivalentna subtranzijentna šema prikazana je na sl. 10.14. Sa te šeme se računa *ems* iza subtranzijentne reaktanse na osnovu podataka iz normalnog radnog stanja o U_M i I_{AM} :

$$E_{AM} = U_M - jI_{AM} (X_{\gamma s} + X_{\gamma r}) \tag{10.56}$$

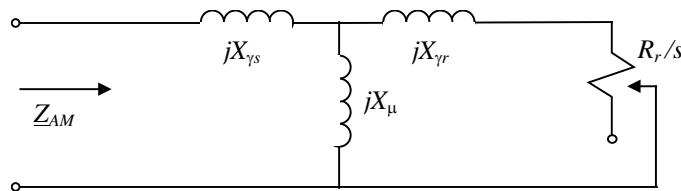
Ova *ems* je merodavna za vrednost struje subtranzijentnog perioda koju daje asinhroni motor:

$$I''_{AM} = \frac{E_{AM}}{X_{\gamma s} + X_{\gamma r}} \tag{10.57}$$

Struja koju mora da prekine prekidač u mreži je ona koja se ima posle 4 do 5 perioda i na tu struju subtranzijentna struja asinhronog motora nema uticaj, jer se ona brže priguši. Međutim, u industrijskim mrežama gde se primenjuju vakuumski prekidači, koji prekidaju struje u trajanju od jedne periode, subtranzijentni doprinos asinhronog motora se mora uvažiti. Slično se ovaj doprinos mora respektovati kod proračuna maksimalne vrednosti struje kratkog spoja (mehaničko dimenzionisanje) ili za proračune reagovanja osigurača.

Kod asinhronog motora se ne razlikuje subtranzijentni i tranzijentni period, jer kod njega nema prisutnih efekata prigušnog namotaja.

Za ustaljeni režim merodavna ekvivalentna šema je ona sa sl. 10.15.



Sl. 10.15 Ekvivalentna šema asinhronog motora direktnog redosleda za proračune ustaljenih struja kratkih spojeva

Ekvivalentna šema asinhronog motora za proračune stacionarnih stanja je obično transformatorskog tipa, sl. 10.15. U njoj odvojene redne grane reprezentuju stator (primar) i rotor (sekundar), dok otočna grana predstavlja reaktansu magnećenja (gubici u gvožđu zanemareni kao i aktivne otpornosti statora i rotora). Zakočeni asinhroni motor definitivno je transformator, a prilikom obrtanja rotorska impedansa postaje funkcija klizanja s .

Nulta reaktansa asinhronih motora nije od interesa pošto se nulti sistem po pravilu ne zatvara kod njih, jer obično nema uzemljenja zvezdišta.

Uticaj asinhronih motora na resultantnu struju kvara na sabirnicama na koje je motor vezan zavisi od snage motora. Ovaj uticaj treba uvažavati ako snaga motora prelazi 1% od neke srednje snage ekvivalentnog generatora, kojim se može aproksimirati mreža. Uticaj obično nije zanemarljiv kod velikih motora i može da se kreće i do 20% od ukupne struje kvara.

Dakle, ukupna struja kratkog spoja, na sabirnicama na kojima je vezan asinhroni motor, se računa kao zbir doprinosa mreže i motora:

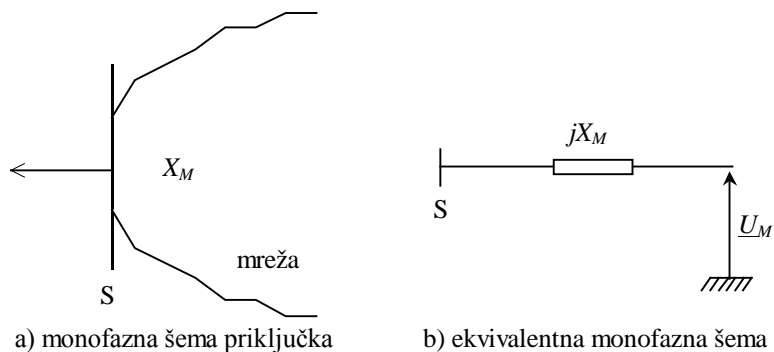
$$\underline{I}''_k = \underline{I}''_M + \underline{I}''_{AM} \tag{10.58}$$

Tipično je kod velikih motora I''_{AM} oko 10% (najviše do 20%) od ukupne struje I''_k . Kod malih motora ovaj uticaj se može zanemariti.

Kod razmatranja metodoloških osnova proračuna struja kratkih spojeva konstatovano je da su impedanse potrošnje najmanje uticajne zato što su vezane otočno. Pošto naponi za vreme trajanja kratkog spoja generalno opadaju to sledi, da struje koje uzimaju ove otočno vezane impedanse potrošnje, postaju veoma male i zato se može smatrati da $Z_p \rightarrow \infty$. Međutim postoje i delovi potrošačkog područja o čijim se impedansama mora voditi računa. To su potrošačka područja sa asinhronim i sinhronim motorima. Ukoliko se kao potrošač pojavljuje sinhrona mašina njegova ekvivalentna šema je u osnovi ista kao i ekvivalentna šema sinhronog generatora. Ako je potrošačko područje sastavljeno od asinhronih motora tada treba posvetiti posebnu pažnju na način kako je to u prethodnom izlaganju ukazano.

10.9. Mreža u proračunima kratkih spojeva

Proračuni kratkih spojeva sa uvažanim svim granama složenih mreža i sa uvažanim svim parametrima pojedinih grana bili bi suviše složeni, čak i za EES koji pokrivaju manja geografska prostranstva.



Sl. 10.16 Ekvivalentna šema mreže za proračune kratkih spojeva

Međutim, savremeni računari pružaju velike mogućnosti za ekstremno složene proračune, pa se danas već radi sa softverskim paketima koji tretiraju trofazne ekvivalente mreža. Ipak inženjerska racionalnost vodi ka logičnim pojednostavljenjima i izbegavanju nepotrebnih složenosti u kojima se mogu izgubiti i iskusni eksperti. Zato se u većini algoritama eksterne mreže (mreže susednih sistema) ekvivalentiraju. U osnovi treba razlikovati delove mreža za koje su neophodni podaci o strujama kratkog spoja i delove mreža za koje ovi podaci nisu potrebni, ali ovi delovi ipak utiču na mrežu (ili deo mreže) od interesa. U principu ukupna interkonekcija u sinhronom radu utiče na struje kratkog spoja pa bi je iz tog razloga trebalo na neki način respektovati. Pošto se interkonekcije rasprostiru na više država, to je neophodne podatke teško saznati a i kad bi se poznavali proračuni bi postali preobimni. Zato se kod proračuna uvažava bliža okolina mreže od interesa za koju je potrebno poznavati rezultate proračuna struja kratkih spojeva, a udaljeniji delovi mreža, ili cele mreže, se ekvivalentiraju preko osnovnih informacija o tim mrežama.

Ekvivalentna šema mreže u proračunima struja kratkih spojeva, priključene na sabirnice S, prikazana je na sl. 10.16.

Ako je mreža beskonačne snage onda sledi da je $X''_M=0$. Ukoliko se zna udeo ove mreže u ukupnoj snazi trofaznog kratkog spoja na sabirnicama S, tada se mreža zamenjuje samo sa jednom direktnom reaktansom koja se za subtranzijentni, tranzijentni i ustaljeni period kratkog spoja računa kao:

$$\begin{aligned}
 X''_M &= \frac{U_M^2}{S''_k} \\
 X'_M &= \frac{U_M^2}{S'_k} \\
 X_M &= \frac{U_M^2}{S_M}
 \end{aligned}
 \tag{10.59}$$

U gornjim relacijama S''_M , S'_M i S_M su subtranzijentni, tranzijentni i ustaljeni udeo mreže u ukupnoj snazi kratkog spoja na sabirnicama S.

Potpuno analogno se postupa za inverzni i nulti sistem u kojima se mreža ekvivalentira takođe samo sa jednom (inverznom ili nultom) reaktansom računatom preko udela mreže u snazi jednofaznog kratkog spoja na posmatranim sabirnicama.

Ako udeli snaga kratkog spoja nisu poznati na posmatranim sabirnicama, tada se može orijentaciono uzeti kao merodavna snaga prekidanja prekidača na tim sabirnicama, a ako ni ona nije poznata, tada se pretpostavi da je mreža beskonačno jaka.

Kao mera naprezanja pri kratkom spoju može se uvesti i jedna indirektna veličina poznata pod imenom snaga prekidanja $S_k = \sqrt{3}UI'_k$ koja predstavlja proizvod dve fizičke veličine koje ne egzistiraju istovremeno: (međufaznog) napona datih sabirnica u radnom režimu i (fazne) struje za vreme trajanja kvara. Ova veličina ima više komercijalni a manje tehnički karakter, ali je ipak dosta u upotrebi kod procena potrebnih snaga prekidača. Ova formula ukazuje istovremeno da se $\sqrt{3}$ faktor ne može izbeći ako se u trofaznim kolima ne uvedu računski (linijski) fazori napona i struja.

11. Tehničke implikacije struja kratkih spojeva

Brojne su tehničke implikacije, odnosno posledice određenog nivoa struja kratkih spojeva u jednom sistemu. U narednom delu analize EES ukazaće se samo na neke značajnije implikacije koje utiču bitno na performanse sistema.

11.1. Uzemljenje zvezdišta

Pitanje uzemljenja zvezdišta, odnosno neutralne tačke, u EES-u predstavlja značajan tehničko – ekonomski problem koji se mora pažljivo sagledati jer utiče na rad sistema kako u havarijskim tako i u normalnim radnim stanjima. Naime, pošto su zbirna strujna i naponska naprezanja za vreme trajanja kratkog spoja konstantna, to se izborom načina uzemljenja zvezdišta vrši preraspodela između ove dve vrste naprezanja. Kod izolovanog zvezdišta naponska naprezanja su najveća, dok su strujna minimalna, da bi se kod direktno uzemljenog zvezdišta imala maksimalna strujna naprezanja i najmanja naponska naprezanja.

U osnovi se mogu uočiti 4 karakteristična načina uzemljenja:

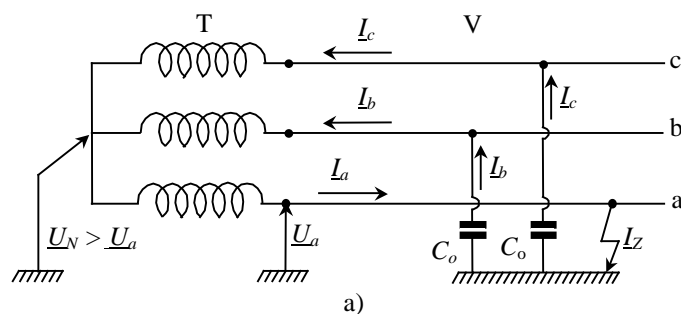
- izolovano zvezdište,
- zvezdište uzemljeno preko Petersenove prigušnice (rezonantno uzemljenje zvezdišta),
- zvezdište uzemljeno preko male impedanse i
- direktno uzemljeno zvezdište.

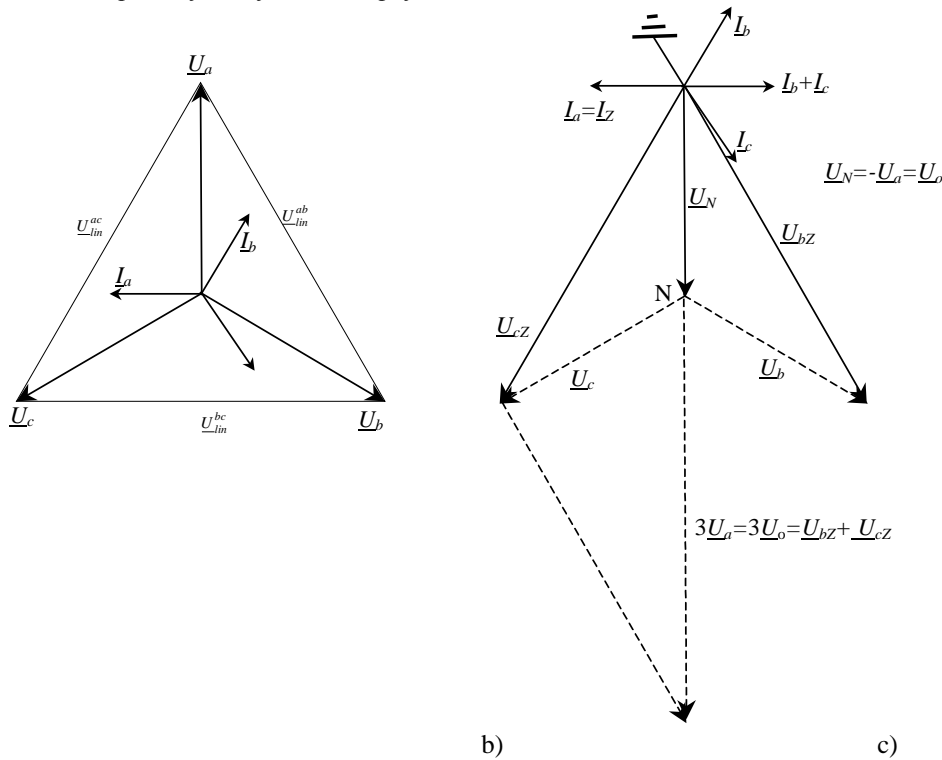
Izbor načina uzemljenja zvezdišta je prevashodno ekonomski i tehnički zadatak visoke složenosti čije je rešavanje uplvisano i tradicionalnim tehničkim koncepcijama i iskustvom u datom sistemu ali i razvojem novih tehnologija.

11.1.1. Izolovano zvezdište

Mreža sa izolovanom neutralnom tačkom (izolovana mreža) je ona kod koje su neutralne tačke svih energetskih transformatora izolovane prema zemlji, tako da se pri spoju faznog provodnika sa zemljom pojavljuju relativno male vrednosti struja kvara ali visoke vrednosti prenapona u stacionarnim i prelaznim stanjima.

Rešenja sa izolovanim zvezdištem, ili kako se to drugačije kaže, sa izolovanom neutralnom tačkom, svakako su sa tačke gledišta investicija najjeftinija, a sa tačke gledišta eksploatacije najjednostavnija.





Sl. 11.1 Ilustracija jednofaznog zemljospoja kod izolovanog zvezdišta
a) slika tokova struja

- b) vektorki dijagram napona i struja pre jednofaznog zemljospoja (vod u praznom hodu)
c) vektorki dijagram napona i struja za vreme trajanja jednofaz. zemljospoja na fazi A

Kod izolovanog zvezdišta jedina mogućnost zatvaranja struja do zemlje, u slučaju kontakta jedne faze sa zemljom, je preko kapacitivnosti faznih provodnika prema zemlji. Pošto se u tako formiranom kolu nalazi velika kapacitivna reaktansa to se uspostavlja male struje kvara dominantno kapacitivnog karaktera.

Terminološki obično se ove struje ne nazivaju strujama jednofaznog (jednopolnog) kratkog spoja, već strujama zemljospoja. Teorijski je pokazano da je u slučaju zemljospoja struja zemljospoja jednaka trostrukoj nultoj struji:

$$\begin{aligned} I_Z &= (I_{k1Z}) = I_d + I_i + I_o = 3I_o \\ I_Z &= \frac{3U_{fr}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o} \end{aligned} \quad (11.1)$$

U praktičnim situacijama u imenitelju dominira $\underline{Z}_o = \frac{1}{j c_o \omega}$ jer je, za tipične nadzemne vodove, $c_o \approx 5 \cdot 10^{-9}$ F/km pa je u tom slučaju:

$$\underline{Z}_o = \frac{1}{j \cdot 314 \cdot 5 \cdot 10^{-9}} \approx -j \cdot 0,6 \cdot 10^6 \Omega/\text{km} \quad (11.2)$$

~~Kako su tipične vrednosti direktne i inverzne reaktanse u ovakvim situacijama reda nekoliko desetina Ω (što zavisi od dužine mreže), to se vidi da nulta kapacitivna reaktansa reda M Ω definitivno dominira nad direktnom i inverznom. Dakle, u ovim analizama, kod proračuna struja zemljospoja, odlučujući uticaj ima upravo nulta kapacitivnost c_o u F/km, odnosno odgovarajuća susceptansa, i obično se iz tih razloga celokupna mreža od interesa ekvivalentira u jedinstvenu kapacitivnost prema zemlji C_o u F.~~

$$C_o = \sum_{i=1}^n c_{o_i} L_i \quad (11.3)$$

gde je:

L_i - dužina i -tog voda u km,

n - ukupan broj vodova koji čine galvanski povezanu mrežu od interesa a polaze sa istih sabirnica.

Aktivna komponenta struje zemljospoja obično nije veća od 5% od ukupne struje zemljospoja i iz tih razloga se struja zemljospoja uglavnom tretira kao čisto kapacitivna. Iz tih razloga su na sl. 11.1 nacrtane samo kapacitivne struje. Imajući u vidu prethodne konstatacije struja zemljospoja se za homogene mreže (kod kojih je nulta podužna kapacitivnost ista), računa kao:

$$\underline{I}_Z = j3U_{fr.c_0} \omega \sum_{i=1}^n L_i \quad (11.4)$$

Važno je ukazati da zemljospoj u izolovanoj mreži nije pravi jednofazni kvar. Strujna asimetrija koja je karakteristična za jednofazni kratki spoj postoji na mestu kvara, ali se ona smanjuje krećući se prema napojnoj tački, odnosno prema transformatoru. Strujna asimetrija na krajevima transformatora odgovara nekoj vrsti dvofaznog kratkog spoja bez zemljospoja jer je suma struja:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$$

Na osnovu ovoga se vidi da ne postoji nulta komponenta struje. Strujna asimetrija duž voda nije konstantna, dok je naponska asimetrija u celoj mreži konstantna. Razlog ovome je činjenica da su redne impedanse i struja zemljospoja male, tako da je nulta komponenta napona u svim tačkama jednaka nultoj komponenti napona na mestu kvara.

Preko ove formule procenjuje se struja zemljospoja I_Z kod mreža sa izolovanim zvezdištem. Sa vektorskog dijagrama struja i napona pri jednofaznom zemljospoju, sl. 11.1, jasno se vidi da zvezdište dolazi na fazni radni napon, a zdrave faze dolaze na linijske napone. Stacionarni koeficijenti prenapona kod ovih mreža su onda prirodno $\sqrt{3}$, odnosno za vreme trajanja zemljospoja naponi faza koje nisu u kvaru postaju jednaki linijskim naponima. Iz tog razloga rad sa izolovanim zvezdištem moguć je samo u mrežama kod kojih je ovaj nivo izolovanosti opreme zadovoljen.

Tipična primena izolovanog zvezdišta je kod nadzemnih 10 kV-nih mreža. Zbog malih vrednosti struja zemljospoja rad sa zemljospojem je moguć na dužem vremenskom periodu bez prekidanja pogona. Pri tome se računa na samogašenje prolaznih zemljospojeva bez automatskog isključivanja voda u kvaru. Teškoće u eksploataciji mogu se pojaviti prilikom određivanja mesta zemljospoja na vodu, jer su struje zemljospoja svega nekoliko A. Granica do koje se izolovano zvezdište sme da koristi u praksi je određena veličinom struje samogašenja. Uslov samogašenja struje zemljospoja je teško egzaktno ustanoviti. Prema praktičnim saznanjima i eksperimentima obično se smatra:

$$I_Z \leq 5 \text{ A}$$

Ovaj uslov je vrlo strog i na stranu je sigurnosti (pesimističkog je tipa), odnosno sigurno je da će se pod određenim okolnostima i struje zemljospoja veće od 5 A ugasi same od sebe. Takvi kvarovi, kod kojih se struje zemljospoja gase same od sebe, nazivaju se prolaznim kvarovima (npr. jednofazni prolazni zemljospoj). Uslovi od kojih ovo zavisi su složena funkcija intenziteta struje, vlažnosti vazduha, vetra i ostalih okolnosti na mestu kvara.

Za veće struje zemljospoja, u mrežama sa izolovanim zvezdištem, moguće je da dođe do višestrukog uzastopnog paljenja i gašenja luka na mestu kvara. Posledica ovakvih procesa po pravilu je pojava intermitentnih prenapona koji nastaju superpozicijom naizmeničnih komponenti osnovne i povišene frekvencije, koje se javljaju pri paljenju luka, na statički potencijal zaostao prilikom prethodnog gašenja luka. Granične vrednosti prenapona u realnim situacijama su reda 3 (što znači da je prenapon oko 3 puta viši od maksimalne vrednosti faznog napona). U praksi, u većini realnih situacija, registrovane struje samogašenja su znatno iznad 5A. Verovatnoća samogašenja struje zavisi uglavnom od vrednosti struje zemljospoja i nešto manje od nominalnog napona mreže. Tako se za izolovane nadzemne mreže 10 i 20 kV struja samogašenja kreće do 35 A, za izolovane mreže 35 kV ova struja je oko 45 A, a za izolovane kablovske mreže 10 kV ona iznosi oko 60 A.

U mrežama gde se koristi izolovano zvezdište kvarovi se ne moraju automatski isključivati, već se mogu pustiti da traju. Kada se pojavi zemljospoj, nastane struja kapacitivnog karaktera koja će se ili ugasi sama od sebe ili će nastaviti da teče. Teškoće se posebno imaju kada ne dođe do samogašenja, i to posebno kod kablovskih mreža, jer tada zemljospoj obično preraste u dvofazni ili trofazni kratki spoj. Kod kablovskih mreža pravih prolaznih kvarova gotovo da i nema, odnosno samozaceljenja izolacije su retka. Treba imati u vidu da ovakva samozaceljenja ostavljaju slaba mesta koja mogu biti uzrok naknadnih pojava opasnih višestrukih kvarova.

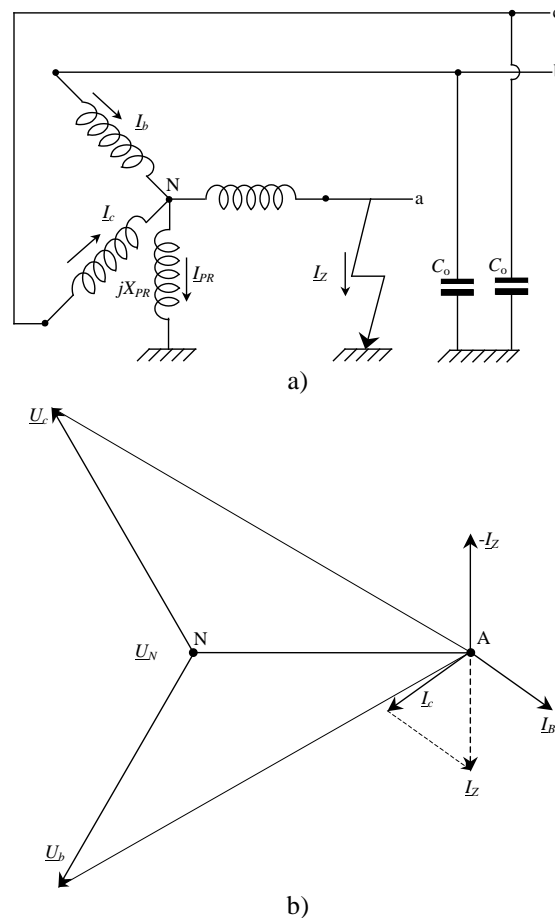
Prema našoj praksi preporučuje se da nadzemne mreže 10 i 20 kV rade sa izolovanom neutralnom tačkom pošto su kapacitivne struje zemljospoja veoma male (oko 0,03 A/km za mrežu 10 kV, odnosno 0,07 A/km za mrežu 20 kV), pa je iz tog razloga mala i ukupna kapacitivna struja zemljospoja galvanski vezane nadzemne mreže 10 i 20 kV. Pored ovih mreža i manje razvijene kablovske mreže 10 kV mogu da rade sa izolovanom neutralnom tačkom. Ovo su po pravilu mreže manje rasprostranjenosti, odnosno mešovite mreže kod kojih sa istih sabirnica polaze i nadzemni i kablovski vodovi. Prelazak na uzemljavanje zvezdišta kod mreža (preko niskoomske impedanse) preporučuje se kad kapacitivne struje zemljospoja prelaze 20 A za kablovsku ili mešovitu mrežu 10 kV (oko 15 km kablovskih vodova koji su u normalnom pogonu galvanski vezani sa određenim postrojenjem), odnosno 15 A za kablovske ili mešovite mreže 20 kV (oko 6 km kablovskih vodova koji su u normalnom pogonu galvanski vezani na iste sabirnice). Izuzetno se može tolerisati rad ovakvih mreža i sa višim vrednostima struja zemljospoja ako se radi o prelaznim rešenjima ali najviše do vrednosti struje zemljospoja od 40 A u mreži 10 kV (oko 30 km galvanski povezane kablovske mreže 10 kV), odnosno do vrednosti struje zemljospoja od 30 A u mreži 20 kV (oko 12 km galvanski povezane kablovske mreže 20 kV). Ako se postupi na ovaj način sigurno treba računati sa povećanom verovatnoćom pojave više jednovremenih kvarova i havarija.

Ako pojava dugotrajnog zemljospoja u jednom trenutku pređe u međufazni kratki spoj na istom mestu (ista lokacija), tada se automatski ide na isključenje voda u kvaru. Ako su ovakve pojave učestale tada rad sa izolovanom mrežom gubi svoje glavno preimućstvo, a to je mogućnost trajnijeg rada sa zemljospojem sa planskim isključenjem potrošača i prelaskom na rezervno napajanje. Po pravilu se ovo dešava pri većim strujama zemljospoja s tim da granične struje obično treba eksperimentalno utvrditi. Ako se ove granične vrednosti prekorače tada se prelazi na neki drugi način uzemljenja zvezdišta.

11.1.2. Zvezdište uzemljeno pomoću Petersenove prigušnice

(kompenzovane mreže)

Kod ovih mreža vrši se kompenzacija struje zemljospoja. Najčešće se za ove potrebe koristi Petersenova prigušnica (Petersenka). Ovakav način uzemljavanja svodi se u stvari na rezonantno uzemljavanje zvezdišta. Ekvivalentna impedansa koja se vidi sa mesta kvara je:



Sl. 11.2 Ilustracija jednofaznog zemljospoja u slučaju zvezdišta uzemljenog preko Petersenove prigušnice
a) slika tokova struja

b) vektorski dijagram za vreme trajanja zemljospoja

Podešavanjem jednakih apsolutnih vrednosti, dolazi se do rezonantnog efekta, pošto se teorijski ima beskonačno velika nulta impedansa gledana sa mesta kvara. Prema tome struja zemljospoja je teorijski ograničena na nulu, a ekvivalentna impedansa viđena sa mesta kvara je:

$$Z_o = \frac{j3\omega L_{PR} \frac{1}{j\omega C_o}}{j(3\omega L_{PR} - \frac{1}{\omega C_o})} \quad (11.5)$$

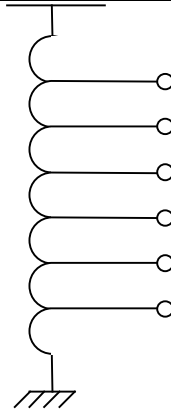
Dakle, kroz reaktansu Petersenove prigušnice, X_{PR} , poželjno je da teče struja I_{PR} , približno jednaka struji zemljospoja u mreži, I_Z . Vidi se sa sl.11.2 da važi:

$$I_{PR} = I_Z - I_b - I_c \quad (11.6)$$

Uslov rezonantnog uzemljenja zvezdišta formalno se svodi na:

$$3\omega^2 L_{PR} C_o = 1 \quad (11.7)$$

Potpuna kompenzacija se u praksi izbegava da bi se predupredili rezonantni prenaponi koji mogu da se pojave pri prekidu faznih provodnika. Prigušnice u zvezdištu, zvane "Petersenke", (nazvane tako po svom autoru) se praktično izvode sa izvodima (otcepima) kao što je to pokazano na sl. 11.3.



Sl. 11.3 Praktično izvođenje "Petersenke"

Ove prigušnice projektuju se najčešće za sledeće nominalne struje: $I_{nPR} = 5; 10; 15; 20; 25; 30$ A.

Postupak izbora prigušnice u principu bi mogao da se opiše na sledeći način. Najpre se nađe kapacitivna struja zemljospoja i proverí se da li je zadovoljen uslov samogašenja, odnosno kriterijumi za pogon sa izolovanim zvezdištem. Ako ovo nije slučaj tada je jedno od mogućih rešenja uzemljavanje zvezdišta preko Petersenove prigušnice. Ako se za struju zemljospoja prilikom proračuna dobije npr. 17 A, onda se odabere prigušnica sa $I_n = 15$ A ili 20 A, u zavisnosti da li se želi efekat pod-kompensacije ili nad-kompensacije.

U našoj zemlji "Petersenke" se ne koriste mnogo. Razlozi se svode na neke tradicionalne inženjerske rezone ali i na okolnosti da su ova rešenja skupa i zahtevaju podešavanje (pri promeni uklopnog stanja mreže) i održavanje. Nadalje u mrežama sa više zvezdišta ne zna se koliko "Petersenki" treba staviti i na koja mesta, pa se zadatak mora proširiti i na optimizaciju broja i snage "Petersenki". Osnovno tehničko ograničenje za primenu ovog rešenja je ostvarenje uslova za samogašenje struje zemljospoja na mestu kvara.

Inače tipična primena "Petersenki" je u alpskim zemljama na naponskim nivoima 35 kV i 110 kV.

Snaga "Petersenke" se računa kao:

$$S_{PR} = U_{fnt} I_{nPR}$$

U prethodnoj relaciji sa U_{fnt} je obeležen fazni nominalni napon transformatora u čije zvezdište se vezuje Petersenova prigušnica, a sa I_{nPR} nominalna struja Petersenove prigušnice. Tipično se ima da je za spregu transformatora zvezda - zvezda snaga Petersenove prigušnice oko 10% snage energetskog transformatora, u čije zvezdište se prigušnica ugrađuje:

$$S_{PR} \leq 0,1 \cdot S_{nT} (YY)$$

Cena "Petersenke" prati ovaj odnos, tako se ima da je ona tipično oko 10% u odnosu na cenu transformatora kod ove sprege, a kod drugih sprege i do 20%. Kod primene "Petersenki" neke elektroprivrede su krenule u pravcu pune automatizacije imajući u vidu trendove prema kojima uređaji za telesignalizaciju i telekomandovanje postaju u savremenim tehnološkim rešenjima sa sve pristupačnijim cenama.

I kod primene "Petersenke", kao i kod izolovanog zvezdišta naponi zdravih faza postaju međufazni naponi dok zvezdište dobija fazni napon i prema njemu se dimenzioniše njegova izolacija. Sva izolacija u takvoj mreži mora biti dimenzionisana na međufazni napon.

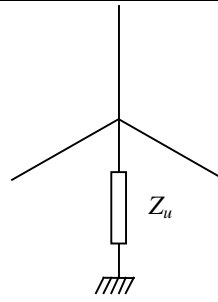
Pored reaktivne komponente struje kod "Petersenke" je značajno uvažiti (posebno na 110 kV) i aktivnu komponentu struje zemljospoja, pošto aktivna otpornost Petersenke iznosi približno $R \approx 0,02\omega L_{PR}$. Aktivna komponenta struje postoji i pri punoj kompenzaciji reaktivne snage, ali aktivna komponenta struje (rezistivna struja) se neuporedivo lakše gasi (i struja i napon jednovremeno prolaze kroz nulu). U svim prethodnim sagledavanjima aktivna komponenta struje zemljospoja nije uvažavana jer je njen doprinos ukupnoj struji mali.

11.1.3. Uzemljenje preko male impedanse

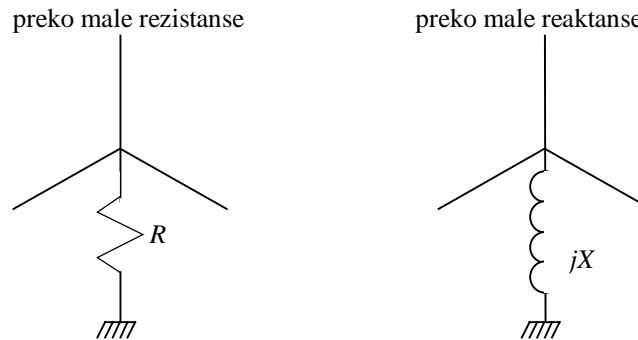
Ako se neutralna tačka jednog ili više energetskih transformatora uzemlji preko male impedanse, Z_u , tada se mogu ograničiti i struja zemljospoja i prelazni prenaponi pri nastanku jednofaznih zemljospojeva, sl. 11.4. Razlikuju se dva načina uzemljavanja: uzemljenje preko male rezistanse i uzemljenje preko male reaktanse, sl. 11.5.

Kod ovakvih rešenja, u odnosu na izolovano zvezdište, ima se povećana struja zemljospoja koja obezbeđuje stabilan luk na mestu kvara čime se onemogućava pojava intermitentnih prenapona (jer nema efekta samogašenja struje zemljospoja).

Ove veće struje kvara pojednostavljuju detekciju kvara i zaštitu ali zahtevaju automatsko isključenje svakog jednofaznog zemljospoja (što može da poveća vreme trajanja prekida isporuke električne energije). Kod nadzemnih mreža ove slabosti se mogu ublažiti uz primenu tehnike automatskog ponovnog uključenja (APU), o čemu će više reči biti kasnije.



SI. 11.4 Ilustracija uzemljenja zvezdišta preko male impedanse



SI. 11.5 Zvezdišta uzemljena preko male impedanse (rezistanse i reaktanse)

Struja zemljospoja se prema prethodnim analitičkim izrazima računa kao:

$$I_Z = \frac{3U_{fr}}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o + 3\underline{Z}_u} \quad (11.8)$$

gde su \underline{Z}_d , \underline{Z}_i i \underline{Z}_o direktna, inverzna i nulta impedansa gledane sa mesta kvara, a \underline{Z}_u mala impedansa uzemljenja zvezdišta (tipično oko 20 Ω). Kako u realnim okolnostima važi da je: $\underline{Z}_u \gg (\underline{Z}_d + \underline{Z}_i + \underline{Z}_o)$ to se struja zemljospoja u ovom slučaju svodi na:

$$I_Z \approx \frac{U_{fr}}{\underline{Z}_u} \quad (11.9)$$

Činjenica da se nulta komponenta struje javlja samo kod kvarova sa zemljospojem i kod nekih rednih nesimetrija se koristi u zaštiti tako da je prekostrujni relej, koji prati nultu komponentu struje, moguće podesiti i na struje manje od radnih struja voda čime se ostvaruje velika osetljivost ove zaštite pri kvarovima sa zemljospojem u mrežama sa uzemljenim zvezdištem (mreže uzemljene preko male impedanse).

Prednost uzemljenja preko male rezistanse se sastoji u efikasnijem prigušenju prelaznih procesa. Mala rezistansa se izvodi ili kao metalni ili kao elektrolitički otpornik, u kom slučaju je potrebno pojačano održavanje.

Prednosti uzemljenja preko male reaktanse se svode na lakše konstruktivno rešenje prigušnice u zvezdištu. Ograničenja na minimalne omske vrednosti za R i X se svode na uslov da struje kvara ne postanu prevelike. Ograničenje na maksimalne vrednosti je diktirano potrebom da se moraju imati izvesna prekoračenja struja zemljospoja u odnosu na radne struje (tipično 30%) kako bi delovala zaštita, naravno uz ograničenje da zaštita ne sme da isključuje normalne radne struje:

$$I_{k1Z} = (1,2 \div 1,3)I_{rmax}$$

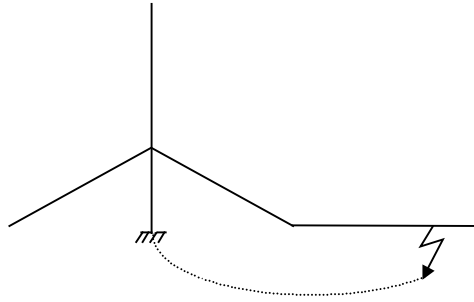
Investiciona ulaganja su kod ovog načina uzemljenja veća nego u slučaju izolovanih mreža, ali manja nego kod kompenzovanih mreža.

Najveći broj mreža 10 kV i 20 kV (kod nas) radi sa izolovanom neutralnom tačkom. To su mreže manje rasprostranjenosti u kojima struje kvara ne prelaze 30 A. Mreže 35 kV rade ili sa izolovanom neutralnom tačkom ili sa uzemljenom preko male impedanse. Struja zemljospoja se ograničava ili na 300 A ili 1000 A. Kao jedno od racionalnih rešenja za 10; 20 ili 35 kV koristi se uzemljenje preko male impedanse uz primenu APU. Druga varijanta zaštite se rešava preko neselektivne signalizacije pa sve do skupih rešenja sa selektivnom. U Beogradu se za 10 kV kablovsku mrežu koristi uzemljenje preko male otpornosti sa ograničenjem struje zemljospoja na 300 A. Za 10 kV nadzemne vodove, koristi se pogon sa izolovanom neutralnom tačkom i signalizacijom struje zemljospoja.

11.1.4. Direktno uzemljenje zvezdišta

Direktno uzemljena mreža je ona kod koje je neutralna tačka jednog ili više energetskih transformatora neposredno vezana na uzemljivač postrojenja. Koristi se kod najviših napona: 110, 220 i 400 kV u našim mrežama. Struja se zatvara u kolu čija je impedansa izuzetno niska. Struje kvara su jako visoke i reda su od nekoliko kA pa do nekoliko desetina kA. U ovom

slučaju naponi i za vreme kvara ostaju fazni, odnosno naponska naprezanja su minimalna pa se izolacija dimenzioniše prema kriterijumima za mreže sa efikasno uzemljenim zvezdištem.



Sl.11.6 Ilustracija direktno uzemljenog zvezdišta

Da bi se procenio efekat uštede na izolaciji potrebno je definisati faktor smanjenja vrednosti stacionarnih prenapona (koji je funkcija faktora uzemljenja). On se definiše kao odnos napona zdravih faza prema linijskom (međufaznom odnosno složenom) naponu mreže, na mestu jednofaznog kratkog spoja (jednofaznog zemljospoja). Za efikasno uzemljene mreže faktor uzemljenja ne sme da pređe vrednost od 0,8, a što znači da pri jednofaznom kratkom spoju naponi zdravih faza prema zemlji ne smeju da pređu 80% vrednosti maksimalno dozvoljenog međufaznog napona mreže. Posledica ovakvog zahteva je da je praktična ušteda izolacije tipično oko 20% kod direktno uzemljenog zvezdišta, u poređenju sa rešenjem sa izolovanom mrežom. Drugim rečima kod direktno uzemljenog zvezdišta naponski problemi su zamenjeni sa strujnim problemima.

Kod mreža sa direktno uzemljenim zvezdištem (po pravilu su to mreže visokih napona), koristi se tehnika APU (automatsko ponovno uključanje). Ovakva koncepcija je moguća zahvaljujući činjenici da je 70 – 80% kvarova prolaznog karaktera izazvanih prenaponima, zaprljanošću izolacije ili prouzrokovanih dodirima provodnika sa drvećem ili usled spojeva zbog velikih ptica i sličnih okolnosti. Ovakvi kratki spojevi se često nazivaju nemetalnim jer je njihov najveći broj prolaznog tipa. Nakon nastanka kvara električni luk na mestu kvara održava pogonski napon voda. Ako se vod isključi luk se gasi i nakon ponovnog uključanja voda pod napon luk se više ne pali ako je kvar prolaznog karaktera. Dužina beznaponske pauze koja se koristi kod primene tehnike APU mora se odabrati tako da se ostavi dovoljno vremena za dejonizaciju prostora. Pokazuje se da je vreme dejonizacije električnog luka pri trofaznom isključenju zavisno, ali ne izrazito, od naponskog nivoa. Za mreže 35 kV ovo vreme iznosi oko 4 periode (80 ms), za mreže 110 kV oko 140 ms, za mreže 220 kV oko 300 ms i za mreže 400 kV oko 400 ms.

Najveći broj kvarova u mrežama je jednofaznog tipa, tako da je i tehniku APU najlogičnije realizovati kao tehniku jednofaznog APU. Ovo je posebno značajno kod visokonaponskih prenosnih mreža zbog činjenice da se za vreme trajanja beznaponske pauze na fazi pogođenoj kvarom, može po zdravim fazama preneti značajna aktivna snaga i time ublažiti probleme povezane sa stabilnošću EES, o čemu će više reči biti u delu analize koji tretira problematiku stabilnosti.

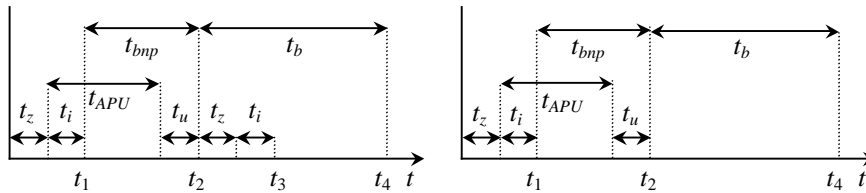
Druga moguća varijanta je tehnika trofaznog APU koja se primenjuje u srednjenaponskim distributivnim mrežama, u kojima nema problema stabilnosti.

Ciklusi neuspešnog i uspešnog APU prikazani su na sl. 11.7. Na osnovu sl. 11.7a vidi se da nakon pojave kvara reaguje zaštita po isteku vremena reagovanja zaštite t_z . Zaštita aktivira i prekidač i uređaj APU. Prekidač isključuje kvar nakon vremena t_b , odnosno u trenutku t_1 . Po isteku podešene beznaponske pauze t_{APU} uređaj APU daje komandu za uključanje prekidača. Prekidač uključuje nakon vremena t_u , odnosno u trenutku t_2 . Tako se ima da je stvarna beznaponska pauza na vodu $t_2 - t_1 = t_{bnp}$. Ako je $t_1 \neq t_u$ tada je i $t_{APU} \neq t_{bnp}$ i to treba uvažiti. Prekidač pri uključanju deluje na uređaj za APU tako što ga blokira za naredni period t_b . Ako je kvar trajan delovaće ponovo zaštita i aktiviraće prekidač koji će definitivno isključiti kvar. Pri drugom delovanju zaštite uređaj za APU je već blokiran tako da ne dolazi do ponovnog uključanja prekidača.

Ciklus uspešnog APU identičan je ciklusu neuspešnog APU sve do trenutku t_2 . U slučaju prolaznog kvara a nakon uključanja prekidača (trenutak t_2) nema pojave uključanja na kvar i vod nastavlja sa normalnim pogonom. Uređaj za APU se automatski deblokira po isteku vremena t_b .

Što se tiče broja ciklusa tehnika APU može da bude jednociklična, dvociklična ili višeciklična. Najveći broj prolaznih kvarova, čak do 97%, se eliminiše u prvom ciklusu APU. Iz ovog razloga i zbog izbegavanja jakih udara u visokonaponskim mrežama kod njih se koristi isključivo tehnika jednocikličnog APU.

U distributivnim mrežama sa zvezdištem uzemljenim preko male impedanse (struje zemljospoja iznose od 300 do 1000 A) svi pa i prolazni zemljospojevi predstavljali bi jednofazni kratki spoj koji se isključuje delovanjem zaštitnih uređaja u napojnoj transformatorskoj stanici. Ovo bi naravno značilo i prekid napajanja potrošača vezanih na ovu deonicu. Ova slabost se donekle ublažava primenom tehnike APU kojom se ovde posle nešto duže vremenske pauze (reda 0,6 s) ponovo uspostavlja napajanje, ali se time sam prekid, iako je on vrlo kratak, ne izbegava. Tehnika APU treba tako da se podese da vreme isključenja zemljospoja ne bude prebrzo (jer se velik broj zemljospojeva posle 200 do 300 ms sami od sebe eliminišu) a s druge strane nije dobro da zemljospoj dugo traje zbog povišenih potencijala na uzemljenjima usled struja kvara od 300 do 1000 A i eventualnog iznošenja potencijala na niskonaponsku stranu. Ovi oprečni zahtevi rešavaju se i pomoću šantiranja (premoščavanja) faze pogođene kvarom pomoću garniture od tri jednopolna zemljospojna (vakuumska) prekidača. U trenutku nastanka zemljospoja gotovo istovremeno se pobuđuje merni član zemljospojne zaštite na izvodu u transformatorskoj stanici i uključuje odgovarajući pol zemljospojnog prekidača. Zbog vremenskog zatezanja zemljospojna zaštita neće reagovati trenutno, tako da će zemljospojni prekidač imati dovoljno vremena na raspolaganju da ugasi zemljospoj na mestu kvara. Ako je zemljospoj na izvodu trajnog karaktera tada se nakon isključenja zemljospojnog prekidača (koji je u ovom rešenju u neposrednoj sprezi sa zaštitom na izvodu) prosleđuje signal trenutnom članu koji diktira trajno isključenje. Kvar se na ovaj način ne mora da isključuje sa vremenskom zadržkom koja je obično oko 0,5 s, koliko treba da se pobudi zemljospojna zaštita izvoda. Ove precizne ciklične aktivnosti realizuju se pomoću mikroelektronskih logičkih kola.



a)

b)

Sl. 11.7 Ciklus neuspešnog APU (a) i uspešnog APU (b)

Oznake na sl. 11.7 imaju sledeće značenje:

za vremena: t_z - reagovanje zaštite, t_i - isključenja, t_u - uključenja prekidača, t_{APU} - podešena vremenska pauza APU, t_{bnp} - beznaponska pauza voda, t_b - vreme blokade APU.

za trenutke: t_1 - prvog isključenja kvara, t_2 - ponovnog uključenja voda, t_3 - drugog isključenja kvara, t_4 - deblokade APU.

11.2. Faktor uzemljenja

Za ocenu tretmana zvezdišta sa aspekta iznosa struja i napona kratkog spoja za svaki pojedini čvor u mreži, obično se koristi odnos ulaznih impedansi nultog i direktnog redosleda posmatranih odočno iz te tačke. Taj (kompleksni) odnos predstavlja faktor uzemljenja:

$$\underline{k}_u = \frac{\underline{Z}_o^{ekv}}{\underline{Z}_d^{ekv}} \quad (11.10)$$

Za zadatu mrežu faktor uzemljenja se može izračunati za svaki čvor, pri čemu treba ukazati da ako se konfiguracija mreže ne menja onda direktna i inverzna ulazna impedansa ostaju nepromenjene. Naravno sa promenom konfiguracije, menjaju se i ove impedanse. Nulta impedansa ne zavisi samo od konfiguracije mreže već i od načina uzemljenja zvezdišta i sprega transformatora.

Odnos (linijskih ili faznih vrednosti) napona zdravih faza prema radnom naponu mreže koji određuje veličinu stacionarnih prenapona analitički se iskazuje preko faktora uzemljenja. Tako se u slučaju k1Z (zdrave faze su faze b i c) odnos

$\left| \frac{U_b}{U_{ar}} \right|$ i $\left| \frac{U_c}{U_{ar}} \right|$, (odnos linijskih napona zdrave faze za vreme k1Z i linijskog radnog napona), svodi na:

$$\frac{U_b}{U_{ar}} = \frac{(\underline{a}^2 - \underline{a}) + \underline{k}_u(\underline{a}^2 - 1)}{2 + \underline{k}_u} \quad (11.11)$$

$$\frac{U_c}{U_{ar}} = \frac{(\underline{a} - \underline{a}^2) + \underline{k}_u(\underline{a} - 1)}{2 + \underline{k}_u} \quad (11.12)$$

Uticajni faktori u ovim izrazima su samo modul i argument faktora uzemljenja. Radi dalje analitičke obrade korisno je uvesti module i argumente (uglove) impedansi:

$$\underline{Z}_o^{ekv} = Z_o^{ekv} e^{j\phi_o} \quad \text{i} \quad \underline{Z}_d^{ekv} = Z_d^{ekv} e^{j\phi_d}$$

Umesto da se radi sa odnosima kompleksnih veličina u praksi je podesnije operisati sa odnosima efektivnih vrednosti, pa se često kao faktor uzemljenja definiše odnos efektivnih vrednosti napona zdravih faza prema zemlji (faznih napona) za vreme trajanja jednofaznog kratkog spoja i linijske vrednosti radnog napona. Pokazuje se da se za količnike (11.11) i (11.12) dobija identičan izraz ako se za faktor uzemljenja pretpostavi realan broj (slučaj sa zanemarenim aktivnim otpornostima):

$$\frac{U_b}{U_{ar}} = \frac{U_c}{U_{ar}} = \frac{\sqrt{3}}{2 + k_u} \sqrt{k_u^2 + k_u + 1} \quad (11.13)$$

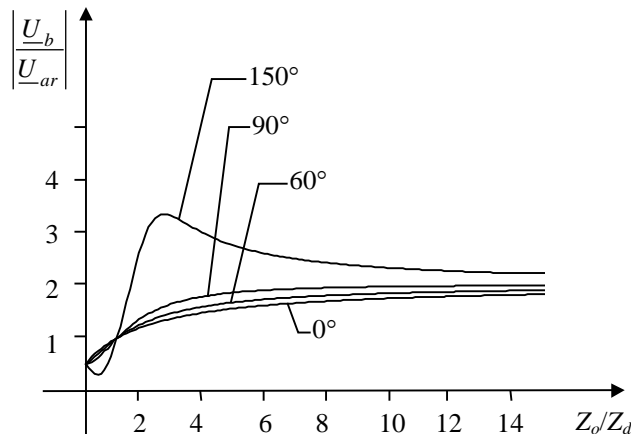
Za napon zvezdišta (odnosno napon neutralne tačke koji je po modulu i znaku jednak nultom komponentnom naponu) sa uvedenim faktorom uzemljenja, se ima sledeća formula:

$$\underline{U}_N = -\underline{Z}_o^{ekv} \underline{I}_o = -\frac{k_u}{2+k_u} U_{fr} \quad (11.14.a)$$

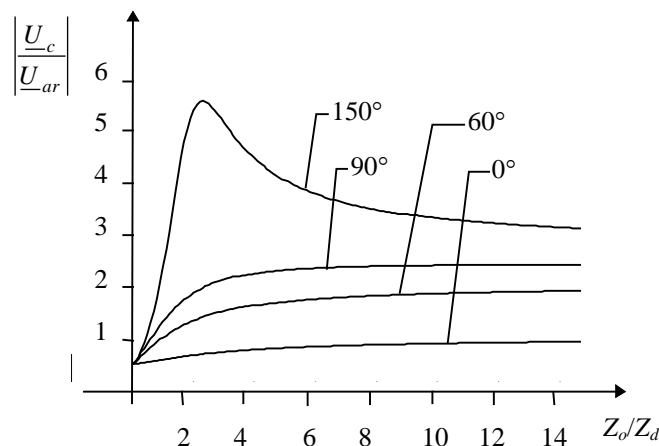
Ako se uvede pretpostavka da je faktor uzemljenja realan i ako se posmatraju samo odnosi modula napona tada se dobija:

$$\frac{U_N}{U_{fr}} = \frac{k_u}{k_u + 2} \quad (11.14.b)$$

Iz (11.14.b) se vidi da za $k_u = 1$ napon zvezdišta postaje jednak trećini faznog radnog napona a fazni naponi zdravih faza baš jednaki faznim radnim vrednostima napona. Dalje se vidi da se za $k_u = \infty$ (slučaj izolovanog zvezdišta) dobija da je napon zvezdišta jednak faznom radnom naponu a naponi zdravih faza postaju jednaki linijskim (međufaznim) vrednostima napona.



Sl. 11.8.a Ilustracija odnosa napona zdrave faze prema radnom naponu u funkciji odnosa impedansi (za vreme jednofaznog kratkog spoja)



Sl. 11.8.b Ilustracija odnosa napona zdrave faze prema radnom naponu u funkciji odnosa impedansi (za vreme jednofaznog

Sa dijagrama na sl. 11.8 se vidi da je u pogledu prenapona, kritična faza c , u stvari kritična je ona faza koja prednjači fazi koja je pogođena kvarom. Kada je razlika uglova ($\varphi_d - \varphi_o$) jednaka nuli ili vrlo mala, imaju se mali prenaponi. Male razlike ($\varphi_d - \varphi_o$) se imaju ako je zvezdište uzemljeno preko male reaktanse, kao i kod direktnog uzemljenja zvezdišta. Najteže prilike se dostižu kada je odnos (Z_o / Z_d) mali (od 0 do 5) i kada je razlika uglova ($\varphi_d - \varphi_o$) velika. Tada naponi i struje mogu da dostignu enormne vrednosti.

Uslov efikasno uzemljenog zvezdišta se svodi na zahtev da stacionarni prenaponi ne pređu $0,8U_{max r}$ (odnosno da ne pređu 80% maksimalne radne vrednosti linijskog napona koji se pojavljuje u mreži). Kada se analitički sprovede postupak ovaj uslov se dekomponuje na dva kriterijuma:

$$\begin{aligned} 0 \leq \frac{Z_o^{ekv}}{Z_d^{ekv}} \leq 3 \quad ; \quad \varphi_d - \varphi_o \leq 30^\circ \\ 0 \leq \frac{Z_o}{Z_d^{ekv}} \leq 1,5 \quad ; \quad \varphi_d - \varphi_o \leq 60^\circ \end{aligned} \quad (11.15.a)$$

Oba uslova su strogi analitički skalarni uslovi. Ovi uslovi se u većini realnih situacija daju pojednostaviti i svesti na:

$$\frac{X_o^{ekv}}{X_d^{ekv}} \leq 3 \quad ; \quad \frac{R_o^{ekv}}{X_d^{ekv}} \leq 1 \quad (11.15.b)$$

U pogledu stacionarnih prenapona najgora je situacija kada je (Z_o^{ekv} / Z_d^{ekv}) malo (između 4 i 6), a pri velikim vrednostima razlike $(\varphi_d - \varphi_o)$. U visokonaponskim mrežama ima se direktno uzemljeno zvezdište i zato je odnos (Z_o^{ekv} / Z_d^{ekv}) vrlo mali, a razlike argumenata $(\varphi_d - \varphi_o)$ su bliske nuli, jer se aktivne otpornosti mogu zanemariti tako da su oba ova ugla bliska 90° . Odatle se zaključuje da je u pogledu prenapona situacija sasvim u redu i nema opasnosti od stacionarnih prenapona.

Kod izolovanih mreža Z_o^{ekv} je jako veliko, pa sledi da je odnos (Z_o^{ekv} / Z_d^{ekv}) velik. Kapacitivni karakter nulte impedanse diktira da je $(\varphi_d - \varphi_o) = 180^\circ$. Sa dijagrama se vidi da se kod ovih mreža ne ulazi u kritičnu zonu.

Kod mreža uzemljenih preko male aktivne otpornosti $(\varphi_d - \varphi_o) = 90^\circ$, a (Z_o^{ekv} / Z_d^{ekv}) može pasti u nepovoljan dijapazon, pa se mora biti pažljiv u pogledu stacionarnih prenapona. Mreže uzemljene preko male reaktanse imaju razliku uglova $(\varphi_d - \varphi_o)$ smanjenu, gotovo blisku nuli, ali povećan odnos (Z_o^{ekv} / Z_d^{ekv}) . Iz ovih razloga kod ovih mreža se mora biti posebno oprezan u pogledu stacionarnih prenapona.

Kompenzovane mreže imaju ulaznu impedansu nultog sistema (Z_o^{ekv}) praktično beskonačno veliku, pa je kod njih količnik k_u dovoljno daleko od kritične oblasti.

11.3. Odnosi struja pri kratkim spojevima

Struja trofaznog kratkog spoja ($k3$) se može računati, prema (6.15), kao:

$$\underline{I}_{k3} = \frac{U_{fr}}{Z_d^{ekv}} \quad (11.16)$$

Struja jednofaznog kratkog spoja ($k1Z$) se saglasno relaciji (6.33) može računati kao:

$$\underline{I}_{k1Z} = \frac{3U_{fr}}{Z_d^{ekv} + Z_i^{ekv} + Z_o^{ekv}} \quad (11.17)$$

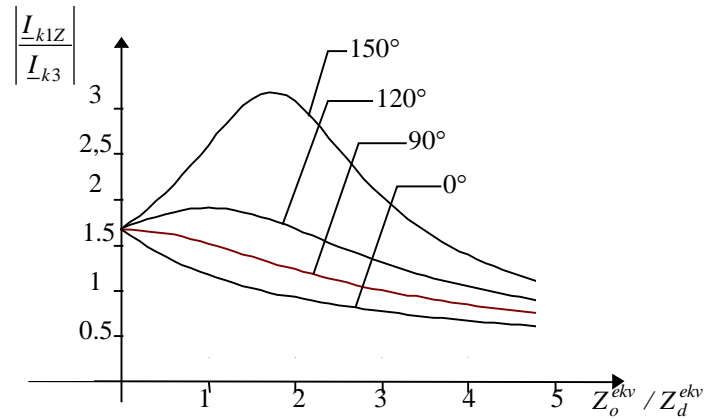
Treba još jednom ukazati da je ovde reč o faznim strujama. Njihov odnos je, pod pretpostavkom da su direktna i inverzna impedansa međusobno jednake:

$$\frac{\underline{I}_{k1Z}}{\underline{I}_{k3}} = \frac{3}{2 + \frac{Z_o^{ekv}}{Z_d^{ekv}}} = \frac{3}{2 + k_u} \quad (11.18.a)$$

U (11.18) sa k_u je obeležena kompleksna vrednost faktora uzemljenja. Ako se sada dodatno pretpostavi da je $Z_o^{ekv} = 0$ tada se jednostavno dobija:

$$\frac{\underline{I}_{k1Z}}{\underline{I}_{k3}} = 1,5$$

U gornjoj relaciji ilustrovan je samo teorijski slučaj. Kod direktno uzemljenog zvezdišta uslovi uzemljenja su takvi da su nulte ekvivalentne impedanse veoma male, ali nisu jednake nuli, tako da se u ovim okolnostima donekle može smatrati da je ova teorijska slika bliska realnosti.



Sl. 11.9 Grafička ilustracija odnosa struja kratkog spoja u funkciji odnosa impedansi

I u ovoj analizi, slično kao prilikom razmatranja stacionarnih prenapona, najteža je situacija kada je odnos (Z_o^{ekv} / Z_d^{ekv}) mali, a pri tome se imaju velike vrednosti razlika uglova ($\varphi_d - \varphi_o$).

Slične analize se mogu sprovesti i za odnose struje dvofaznog kratkog spoja sa zemljom (struja faze b) prema struji trofaznog kratkog spoje. Tada bi se za slučaj da je faktor uzemljenja realan broj (što podrazumeva zanemarenje aktivnih otpornosti) imalo:

$$\frac{I_{k2(b)}}{I_{k3}} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{k_u^2 + k_u + 1}}{2 + k_u} \quad (11.18.b)$$

Za odnos trostruke nulte struje pri dvofaznom kratkom spoju sa zemljom (struje koja u takvim okolnostima teče kroz zemlju) i struje trofaznog kratkog spoja, uz uvedene pretpostavke, bi se imalo:

$$\frac{I_{k2Z}}{I_{k3}} = 3 \frac{I_o}{I_{k3}} = \frac{3}{1 + 2k_u} \quad (11.18.c)$$

11.4. Strujna i naponska naprezanja za vreme trajanja kratkog spoja

Kao polazno razmatranje posmatra se neka mreža za koju se poznaju ulazne impedanse direktnog, inverznog i nultog komponentnog sistema gledane očno sa mesta kvara. Uvodi se pojam referentnog nivoa struje kratkog spoja kao onaj nivo koji odgovara teorijskom slučaju, odnosno kvaru za koji je $Z_o = 0$.

$$I_{k1Z}^{REF} = \frac{3U_{fr}}{Z_d^{ekv} + Z_i} \quad (11.19)$$

iz čega sledi:

$$U_{fr} = \frac{I_{k1Z}^{REF}}{3} (Z_d + Z_i) \quad (11.20)$$

Kada nulta impedansa počne da raste od nule do neke konačne vrednosti pojavljuje se nulta komponenta napona \underline{U}_o :

$$U_{fr} = \frac{I_{k1Z}}{3} (Z_d^{ekv} + Z_i^{ekv} + Z_o^{ekv}) = \frac{I_{k1Z}}{3} (Z_d^{ekv} + Z_i^{ekv}) - \underline{U}_o \quad (11.21)$$

$$U_{fr} + \underline{U}_o = \frac{I_{k1Z}}{3} (Z_d^{ekv} + Z_i^{ekv}) = \frac{I_{k1Z}}{I_{k1Z}^{REF}} U_{fr} \quad (11.22)$$

$$\frac{I_{k1Z}}{I_{k1Z}^{REF}} - \frac{\underline{U}_o}{U_{fr}} = 1 \quad (11.23)$$

Prvi sabirak u relaciji (11.23) predstavlja meru strujnih naprezanja, dok drugi sabirak predstavlja meru naponskih naprezanja. Znak minus se javlja zbog neusaglašenosti pozitivnih smerova nultog napona i nulte struje, odnosno jer je:

$$\underline{U}_o = -\underline{Z}_o^{ekv} \underline{I}_o$$

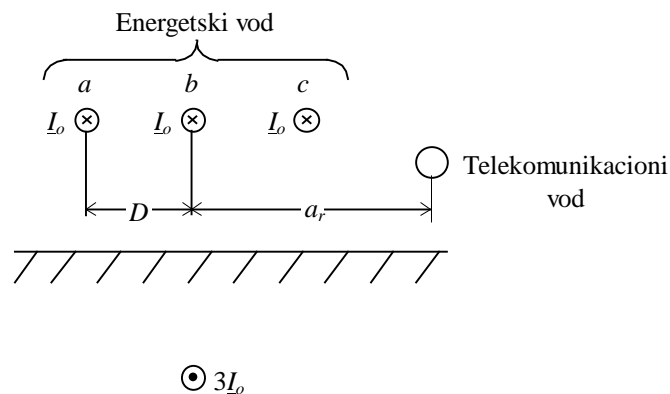
Pri tome i prvi i drugi sabirak predstavljaju neke relativne mere. Zaključuje se da je zbir naponskih i strujnih napreznja pri kIZ konstantan, odnosno da su rezultatna napreznja konstantna i da se ona mogu samo ispoljavati kao strujna ili kao naponska.

11.5. Uticaj energetskih na telekomunikacione vodove

U normalnim radnim simetričnim stanjima, energetski vod praktično nema uticaja na okolinu, pošto tri fazora struja koji čine uravnoteženi trofazni sistem za posmatrača sa strane nemaju efekat. Međutim, već pri radnim nesimetrijama ovaj uticaj dolazi do izražaja. Posebno je taj uticaj jak pri velikim nesimetrijama. Najčešća, pa i najveća nesimetrija je jednofazni kratki spoj (kIZ). Nadalje ovaj uticaj nije od većeg interesa ako se energetski i telekomunikacioni vod vode dovoljno daleko jedan od drugog. Međutim, gustina energetskih i telekomunikacionih vodova u razvijenim državama je takva da se paralelno vođenje teško izbegava.

U principu, razlikuje se elektrostatički i elektromagnetni uticaj na telekomunikacione vodove. Elektrostatički uticaj se ispoljava preko međusobnih kapacitivnosti. Ovaj uticaj je tolerantan i posledica ovog uticaja su smetnje koje nisu osetnijeg karaktera.

Elektromagnetni uticaj se ispoljava preko međusobnih induktivnosti. Kao rezultat tog uticaja indukuju se značajne elektromotorne sile u telekomunikacionom vodu usled proticanja nultih struja u energetskom vodu. Uticaj direktnog i inverznog komponentnog sistema se, naravno, ne oseća pošto su ti sistemi uravnoteženi.



Sl. 11.10 Skica paralelnog vođenja energetskog i telekomunikacionog voda

Na slici 11.10 a_r predstavlja rastojanje između osa telekomunikacionog i energetskog voda.

U realnosti je $a_r \gg D$ i ako ovo važi tada se energetski vod može tretirati kao da je skoncentrisan u jedan provodnik kroz koji teče $3I_o$. U zatvorenoj konturi telekomunikacionog voda kao posledica ove naizmenične struje indukuje se ems :

$$E = j\omega(3I_o)m l_{\Pi} k_r \quad (11.24)$$

U prethodnoj relaciji oznake imaju sledeće značenja:

m -međusobna induktivnost između energetskog i telekomunikacionog voda po jedinici dužine

l_{Π} -dužina paralelnog vođenja energetskog i telekomunikacionog voda

k_r -redukcioni faktor pomoću kojeg se uzima u obzir uticaj zaštitnog užeta kod nadzemnih, odnosno uticaj plašta kabla kod kablovskih vodova, na intenzitet povratne struje kroz zemlju. Kroz ovaj uticaj smanjuje se struja koja teče kroz zemlju, pa se shodno tome smanjuje i indukovana ems u telekomunikacionom vodu, jer je $k_r \leq 1$.

U opštem slučaju redukcioni faktor se računa preko sledećeg izraza:

$$\underline{k}_r = \frac{\underline{Z}_{zu} - \underline{Z}_{ekv}}{\underline{Z}_{zu}} \quad (11.25)$$

U relaciji (11.25) sa \underline{Z}_{zu} je obeležena impedansa zaštitnog užeta nadzemnog voda (to je generalno posmatrano impedansa uzemljenog provodnika koji je postavljen paralelno energetskom vodu, tako da to može da bude i plašt kablovskog voda), a sa \underline{Z}_{ekv} ekvivalentna međusobna impedansa energetskog voda i zaštitnog užeta. Tipične vrednosti za redukcioni faktor na našim nadzemnim vodovima su između 0,6 i 0,7.

Međusobnu induktivnost m , može se proceniti preko empirijskog obrasca:

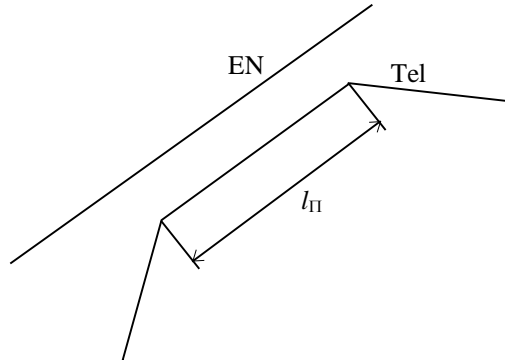
$$m \left[\frac{\text{mH}}{\text{km}} \right] = \frac{4}{\sqrt{a_r [\text{m}]}} \quad (11.26)$$

Ovaj obrazac važi za $\rho_z \approx 50 \Omega$. U opštem slučaju međusobna induktivnost između energetskog i telekomunikacionog voda zavisi od specifične otpornosti tla i učestanosti i tačnije se može izračunati kao:

$$m = 2 \cdot 10^{-4} \ln \left(\frac{658}{a_r} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \right) \quad (11.27)$$

Ovaj rezultat za većinu praktičnih situacija daje vrednosti veoma približne onim koje daje prethodna uprošćena formula.

Idealizovana slika u kojoj se energetski i telekomunikacioni vod vode striktno paralelno je veoma retka. Obično se imaju situacije sa deonicom (deonicama) približavanja, kako je to ilustrovano na sl. 11.11.



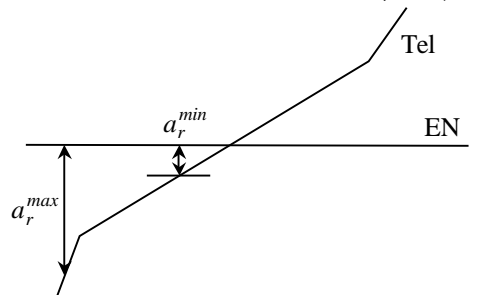
Sl. 11.11 Skica približavanja energetskog i telekomunikacionog voda

Pri tome je bitno ukazati da prilikom ukrštanja, za rastojanja manja od nekih minimalnih, $a_r^{min} \approx 10 \text{ m}$, nema potrebe za izračunavanjem uticaja. Slično važi i za jako velika rastojanja, $a_r^{max} \geq 1000 \text{ m}$, koja predstavljaju distancu iznad koje nema praktične potrebe za izračunavanjem uticaja.

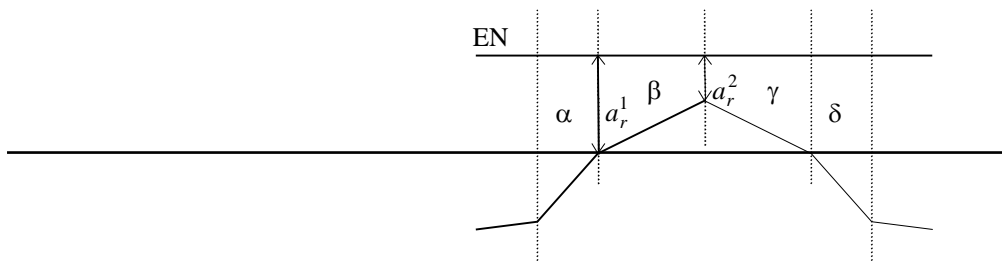
Dakle, uticaj energetskog na telekomunikacioni vod se ne proračunava u samoj zoni ukrštanja, a to je zona gde je $a_r^{min} < 10 \text{ m}$.

Za praksu je posebno važan slučaj izlomljene trase. U ovakvim situacijama indukovana *ems* se računa za svaku deonicu posebno, pa se tako izračunate parcijalne *ems* saberu da bi se dobila ukupna *ems*:

$$E = E_\alpha + E_\beta + E_\gamma + E_\delta \quad (11.28)$$



Sl. 11.12 Skica ukrštanja energetskog i telekomunikacionog voda



Sl. 11.13 Skica izlomljene trase telekomunikacionog voda

Ako su a_r^1 i a_r^2 rastojanja krajeva paralelnog vođenja deonice β tada je: $a_r = \sqrt{a_r^1 \cdot a_r^2}$.

11.5.1. Mere za smanjenje uticaja energetskih na paralelno vodene telekomunikacione vodove

Od mera kojima se može smanjiti indukovana *ems* u telekomunikacionim vodovima treba pomenuti sledeće:

- smanjenje nulte komponente struja (jedan od načina je npr. da se uzemlji manji broj zvezdišta). U principu je moguće krenuti od varijante da su sva zvezdišta uzemljena, pa zatim ići na razemljavanje zvezdišta sve do graničnog kriterijuma koji diktira uslov efikasnosti uzemljenja,

– primena Al-Fe zaštitne užadi; umesto isključive primene samo Fe zaštitne užadi, preko čega se utiče na redukcionni faktor k_r . U slučaju postojanja Al-Fe zaštitne užadi veći deo povratne struje se tada vraća kroz njih i time se uticaj na telekomunikacioni vod smanjuje i

– zamena nadzemnog voda sa kablovskim.

Od mera koje se mogu preduzeti sa aspekta telekomunikacionog voda treba pomenuti:

– izbor trase telekomunikacionog voda,

– zamena telekomunikacionih linija radio vezom,

– primena specijalnih zaštitnih uređaja na telekomunikacionom vodu kao što su:

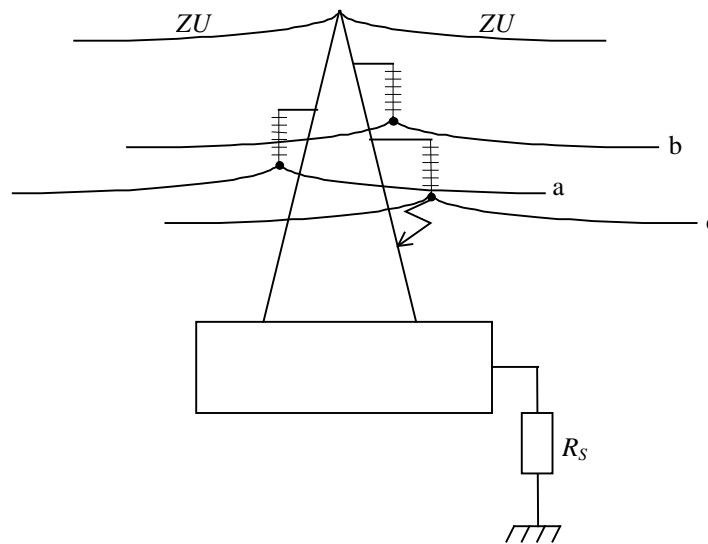
– translatore - uređaji za galvansko odvajanje ili

– postavljanje odvodnika prenapona na telekomunikacionim vodovima.

Prema propisima dozvoljena vrednost indukovane ems zavisi od toga koliko k1Z traje. Pri trajnom k1Z na energetskom vodu dozvoljena indukovana ems na telekomunikacionom vodu iznosi 65 V. Međutim, pod pretpostavkom da se kvarovi isključuju za: $t_i \leq 150$ ms, dopuštena vrednost modukovane ems u telekomunikacionom vodu iznosi 430 V.

11.6. Raspodela struje jednofaznog kratkog spoja u lancu: zaštitno uže - stubovi - zemlja

Kod analize svih elemenata koji formiraju povratni put struje jednofaznog kratkog spoja potrebno je posebno pažljivo proučiti lanac: zaštitno uže - stubovi - zemlja



Sl. 11.14 Skica jednofaznog kratkog spoja na stubu nadzemnog voda

Analiza pokazuje da su kod nadzemnih vodova na raspodelu struje jednofaznog kratkog spoja od uticaja zaštitno uže, zatim stubovi sa svojim uzemljenjem i konačno zemlja kao geološki provodnik. Slična analogija može da se uspostavi i sa složenijim strukturama u kojima se nalaze i kablovski vodovi.

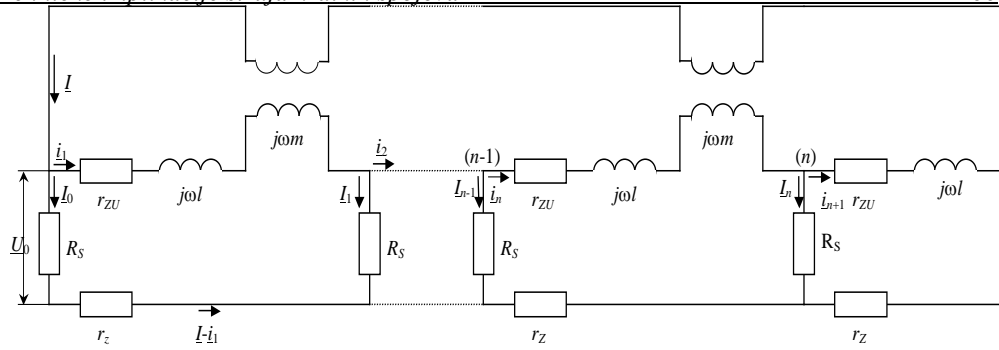
Radi ilustracije problema na sl. 11.14 prikazan je slučaj jednofaznog kratkog spoja na stubu na kome se nalazi jedno zaštitno uže. Treba odmah ukazati da je sve fizičke veličine kod ovakvih analiza prirodno interpretirati po jednom rasponu nadzemnog voda (a ne po 1 km). To se može naglasiti i formalnim drugačijim oznakama veličina, ali se u daljem tekstu podrazumeva. Tako je na sl. 11.14 sa R_s obeležena otpornost stuba sa uzemljivačem stuba i prelazni otpor zemlje po rasponu (očevidno da ovo diktira da i ostale fizičke veličine budu po jednom rasponu).

U osnovi se kod ovih problema mogu da analiziraju dva slučaja: slučaj kada se nulte struje zatvaraju samo sa jedne strane stuba u kvaru (što je u praksi retko) i slučaj kada se nulte struje zatvaraju sa obe strane stuba u kvaru.

Na sl. 11.15 prikazana je kompletna (u smislu da su uvažene međusobne induktivnosti između zaštitnog užeta i faznih provodnika) monofazna šema slučaja kada se nulte struje zatvaraju samo sa jedne strane stuba u kvaru.

Ukupna struja jednofaznog kratkog spoja (obeležena sa I), deo te struje koji direktno teče u zemlju preko otpornosti stuba I_0 i struja koja u ovom slučaju odlazi po prvom rasponu zaštitnog užeta, i_1 , povezane su preko sledeće veze:

$$\underline{I} = \underline{I}_0 + \underline{i}_1 \quad (11.29)$$



Sl. 11.15 Jednopolna šema slučaja

kada se nulte struje zatvaraju samo sa jedne strane stuba u kvaru

Na sl. 11.15 oznake imaju sledeće značenje:

- r_Z - otpornost zemlje po jednom rasponu,
- r_{ZU} - otpornost zaštitnog užeta (ZU) po jednom rasponu,
- l - sopstvene inuktivnosti zaštitnog užeta po jednom rasponu,
- m - međusobna inuktivnost zaštitnog užeta i faznog provodnika po jednom rasponu.

Pored toga sa sl. 11.15 je očividno da važi:

$$i_1 = I_1 + i_2 \tag{11.30}$$

Napon stuba u kvaru, stuba indeksa 0, nalazi se kao:

$$\underline{U}_0 = \underline{I}_0 R_S \tag{11.31}$$

Analogna relacija relaciji (11.31) može se uspostaviti za svaki od stubova pa naravno i za stub indeksa n .

Ako se kao opšti predstavnik stubova u lancu uzme stub indeksa n tada su naponske jednačine koje povezuju napone stubova pre n - tog i iza njega sledećeg oblika:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{n-1} - \underline{U}_n &= i_n (r_{ZU} + j\omega l) - I j\omega m - (\underline{I} - i_n) r_Z \\ \underline{U}_{n-1} - \underline{U}_n &= i_n (r_{ZU} + j\omega l + r_Z) - \underline{I} (j\omega m + r_Z) \end{aligned} \tag{11.32}$$

Relacija koja povezuje napone n - tog i $(n+1)$ - og stuba je, analogno prethodnim relacijama sledećeg oblika:

$$\underline{U}_n - \underline{U}_{n+1} = i_{n+1} (r_{ZU} + r_Z + j\omega l) - \underline{I} (r_Z + j\omega m) \tag{11.33}$$

Sada se posle formiranja razlike jednačina (11.32) i (11.33) dobija:

$$\underline{U}_{n-1} - 2\underline{U}_n + \underline{U}_{n+1} = \underline{I}_n (r_{ZU} + r_Z + j\omega l) \tag{11.34}$$

Zamenom:

$$\underline{I}_n = \underline{U}_n / R_S \tag{11.35}$$

u relaciju (11.34) dobija se :

$$\underline{U}_{n-1} - 2\underline{U}_n + \underline{U}_{n+1} = \frac{\underline{U}_n}{R_S} (r_{ZU} + r_Z + j\omega l) \tag{11.36}$$

Naravno, struja I_n stvara na svom stubu pad napona U_n . Oko stuba u kvaru se ima potencijalni levak. Pod pretpostavkom da se potencijal bilo kog stuba prikaže kao eksponencijalna funkcija stuba koji je pogođen kvarom, stuba indeksa 0, može da se, uz uvođenje koeficijenata slabljenja, α , i faznog koeficijenta, β , da ustanovi sledeća veza:

$$\underline{U}_n = \underline{U}_0 e^{-(\alpha + j\beta)n} \tag{11.37}$$

Zamenom (11.37) u relaciju (11.34) se dobija:

$$\underline{U}_0 \left[e^{-(\alpha + j\beta)n} - e^{-(\alpha + j\beta)(n+1)} \right] = i_{n+1} (r_{ZU} + r_Z + j\omega l) - \underline{I} (r_Z + j\omega m) \tag{11.38}$$

Za poseban slučaj, $n = 0$, nalazi se struja u prvom rasponu (od stuba u kvaru) kao funkcija ukupne struje kvara (struje jednofaznog kratkog spoja) I :

$$i_1 = I \frac{\frac{r_Z + j\omega m}{R_S} + (1 - e^{-(\alpha + j\beta)})}{\frac{r_{ZU} + r_Z + j\omega l}{R_S} + (1 - e^{-(\alpha + j\beta)})} \quad (11.39)$$

Poseban slučaj prethodnog izraza se ima kad se šema redukuje na čisto aktivne otpornosti, odnosno kada važi da su sopstvene i međusobne induktivnosti jednake nuli:

$$\omega l = \omega m = 0$$

Odavde se zaključuje da će i fazni koeficijent biti nula:

$$\beta = 0$$

pa je u pitanju skalarna veza:

$$i_1 = I \frac{\frac{r_Z}{R_S} + 1 - e^{-\alpha}}{\frac{r_{ZU} + r_Z}{R_S} + 1 - e^{-\alpha}} \quad (11.40)$$

Ostaje da se analitički pokaže način izračunavanja koeficijenta slabljenja α . Polazeći od (11.36) i (11.37) sa zamenom $n = 1$ i $\omega l = \omega m = 0$ (odnosno $\beta = 0$) dobija se:

$$U_0 - 2U_0 e^{-\alpha} + U_0 e^{-2\alpha} = \frac{r_{ZU} + r_Z}{R_S} U_0 e^{-\alpha} \quad (11.41)$$

Izraz (11.41) može se generalisati za bilo koji stub tekućeg indeksa n :

$$U_0 e^{-\alpha(n-1)} - 2U_0 e^{-\alpha n} + U_0 e^{-\alpha(n+1)} = \frac{r_{ZU} + r_Z}{R_S} U_0 e^{-\alpha n} \quad (11.42)$$

Naravno, očevidno je da je (11.41) samo poseban slučaj izraza (11.42) kad se u njega smeni $n = 1$. Ako se sada izraz (11.41) podeli sa $U_0 e^{-\alpha}$ tada se dobija:

$$e^{\alpha} - 2 + e^{-\alpha} = \frac{r_{ZU} + r_Z}{R_S} \quad (11.43)$$

Matematičkim transformisanjem se pokazuje da važi:

$$e^{\alpha} - 2 + e^{-\alpha} = (2sh \frac{\alpha}{2})^2 \quad (11.44)$$

a što u vezi sa (11.43) daje:

$$sh \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r_{ZU} + r_Z}{R_S}} \quad (11.45)$$

Za male vrednosti koeficijenta slabljenja α (tipične vrednosti su ispod 0,5) može se sinus hiperbolički aproksimirati samo argumentom:

$$sh \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2} \quad (11.46)$$

tako da se konačno dobija približan izraz za proračun koeficijenta prigušenja:

$$\alpha = \sqrt{\frac{r_{ZU} + r_Z}{R_S}} \quad (11.47)$$

U opštem slučaju sa uvaženim sopstvenim i međusobnim induktivnostima, struja u n - tom rasponu, po analogiji sa prethodnim proračunom, nalazi se kao:

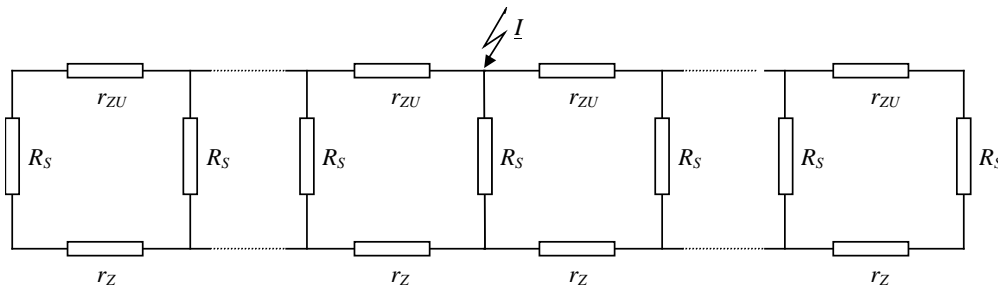
$$i_n = I \frac{r_Z + j\omega m}{r_{ZU} + r_Z + j\omega l} + U_0 \frac{e^{(\alpha+j\beta)} - 1}{r_{ZU} + r_Z + j\omega l} e^{-(\alpha+j\beta)n} \quad (11.48)$$

Ako se sada u izrazu (11.48) zanemare sopstvena i međusobna induktivnost i uvaži veza između napona i struje za stub pogođen kvarom dobija se:

$$i_n = I \frac{r_Z}{r_{ZU} + r_Z} + I_0 \frac{R_S}{r_{ZU} + r_Z} (e^\alpha - 1) e^{-\alpha n} \quad (11.49)$$

Stalni član u izrazu (11.49) se pojavljuje zbog aproksimacije sinusa hiperboličkog samo sa argumentom. Praktične primene ovih izraza svode se na situacije u kojima se analizira intenzitet struje kvara u zaštitnom užetu po pojedinim rasponima, a za hipotetički slučaj zatvaranja struja kvara samo sa jedne strane stuba u kvaru. Pokazuje se da već u petom rasponu oko 80% struje teče kroz stub, a nešto oko 20% kroz zaštitno uže. U 10-om rasponu svega oko 10% struje kvara teče kroz zaštitno uže a sva preostala struja je u zemlji. Ova prostorna raspodela struje jednofaznog kratkog spoja korisna je za vizualizaciju realnih fenomena a može se i u praksi iskoristiti kroz činjenice da se samo određen broj stubova vodi sa zaštitim užetom u blizini postrojenja (ova rešenja se sve više napuštaju zbog težnje da se nadzemni vod štiti celom dužinom od direktnih udara groma). S druge strane proračuni pokazuju da se približna prostorna raspodela struje kvara može dobro proceniti i na osnovu ekvivalentne šeme u kojoj su samo aktivne otpornosti od uticaja. Egzaktnija izračunavanja su potrebna kod proračuna napona koraka i dodira u složenim uzemljivačkim sistemima i takvi proračuni se takođe jednostavno sprovode.

Slika koja je analizirana je hipotetička jer u realnosti struje kvara, po pravilu, mogu da se zatvore sa obe strane stuba u kvaru i takva situacija, sa zanemarenim sopstvenim i međusobnim induktivnostima, je prikazana na sl. 11.16:



Sl. 11.16 Ekvivalentna šema sa mogućnošću zatvaranja struja kvara sa obe strane stuba u kvaru samo sa aktivnim otpornostima

U slučaju kada se nulte struje zatvaraju sa obe strane stuba u kvaru, ekvivalentna otpornost lanca zaštitno uže - stubovi - zemlja, bez stuba u kvaru, je:

$$R_{ekv} = \frac{r_{ZU}}{2(1 - e^{-\alpha}) + \frac{r_Z}{R_S}} \quad (11.50)$$

a sa stubom u kvaru:

$$R'_{ekv} = \frac{r_{ZU}}{2(1 - e^{-\alpha}) + \frac{r_Z + r_{ZU}}{R_S}} \quad (11.51)$$

Očevidno je da važi:

$$R'_{ekv} = R_{ekv} \parallel R_S \quad (11.52)$$

Slične formule se imaju i za slučaj kada se nulte struje zatvaraju samo sa jedne strane stuba u kvaru, samo tada u ovim izrazima nema dvojke u imeniocu. Treba istaći da su u ovim formulama sve veličine date u Ω /rasponu, dakle i otpornost zemlje, je data u Ω /rasponu.

Upravo zbog generalizacije treba ukazati da se slični izrazi mogu izvesti i za ekvivalentne impedanse. Za slučaj kada se nulte struje mogu zatvoriti sa obe strane stuba u kvaru ekvivalentna impedansa lanca zaštitno uže - stubovi - zemlja, uključujući i stub u kvaru, se izračunava kao:

$$\underline{Z}'_{ekv} = \frac{r_{ZU} + j\omega(l - m)}{2[1 - e^{-(\alpha+j\beta)}] + \frac{r_{ZU} + r_Z + j\omega l}{R_S}} \quad (11.53)$$

Ekvivalentna impedansa, bez stuba u kvaru, se shodno prethodnom, računa kao:

$$Z_{ekv} = \frac{r_{ZU} + j\omega(l - m)}{2[1 - e^{-(\alpha + j\beta)}] + \frac{r_Z + j\omega l}{R_S}} \quad (11.54)$$

Ako se izraz (11.54) preuredi taada se dobija:

$$Z_{ekv} = \frac{r_{ZU} + j\omega(l - m)}{2[1 - e^{-\alpha} \cos\beta] + \frac{r_Z}{R_S} + j(2e^{-\alpha} \sin\beta + \frac{\omega l}{R_S})} \quad (11.55)$$

U opštem slučaju α i β se računaju kao:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} + a}{2}} \quad \beta = \sqrt{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} - a}{2}} \quad (11.56)$$

gde su:

$$a = \frac{r_{ZU} + r_Z}{R_S} \quad b = \frac{\omega l}{R_S}$$

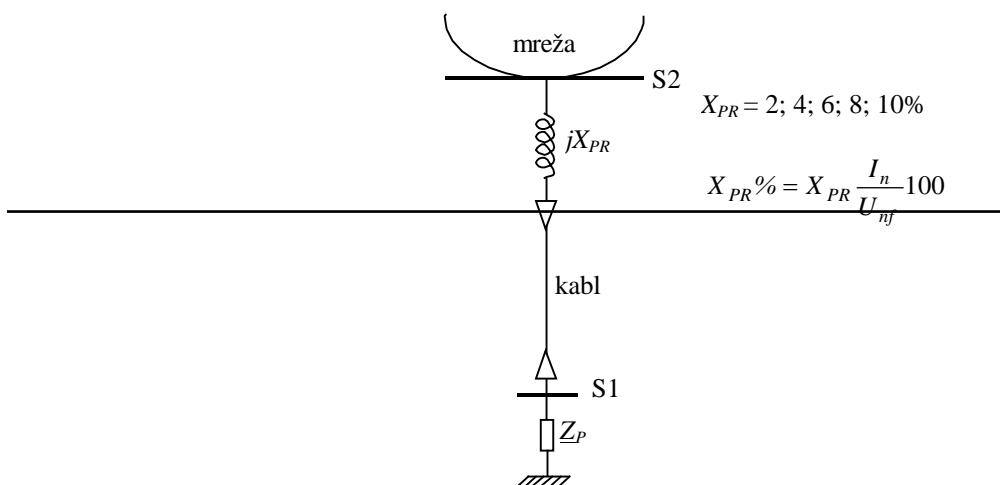
11.7. Ograničavanje struja kratkog spoja

Od praktičnih postupaka za ograničavanje struja kratkog spoja, korisno je napomenuti:

- Povećavanje reaktansi rasipanja transformatora. To se najčešće primenjuje pri direktnoj transformaciji 110/10 kV/kV. S obzirom da se ovakvom transformacijom izbegava jedna transformacija (35 kV naponski nivo), to je prirodno da se reaktansa rasipanja poveća sa 10% na oko 18%. Rasipanje se kod transformatora poveća tako što se namotaji razmaknu u postupku proizvodnje transformatora.
- Korišćenje redne prigušnice (koriste se prigušnice bez gvođenog jezgra kao linearni induktivni elementi).
- Povećanje nulte impedanse tako što se vrši uzemljavanje zvezdišta ili njihovo izolovanje izborom optimalnog broja uzemljenih zvezdišta.
- Sekcionisanje mreže.

11.7.1. Redna prigušnica za ograničavanje struje kratkog spoja

Redna prigušnica radi ograničavanja struja kratkog spoja se tipično koristi u kablovskim SN mrežama. Kod ovakvih realizacija ona se vezuje na red sa kablovskim vodom, sl. 11.17.



Sl. 11.17 Primena redne prigušnice u kablovskoj SN mreži

Za vreme trajanja kratkog spoja na sabirnicama S1 prigušnica veoma efikasno ograničava struje kratkog spoja, jer su one dominantno induktivnog karaktera (ako se pretpostavi da je aktivna otpornost kabla zanemariva i da je mreža dovoljno jaka, tada su struje gotovo čisto induktivne).

Za vreme normalnog radnog stanja, pod pretpostavkom da je impedansa potrošnje Z_p koju napaja ovaj vod, rezistivna ($\cos \varphi_p \approx 1$), imaju se veoma mali padovi napona na ovoj rednoj prigušnici, jer čisto aktivna struja stvara veoma mali pad napona na posmatranoj prigušnici. Tako se negativni efekti u normalnom radu mogu ublažiti samo u slučaju kada je potrošnja pretežno aktivna.

11.7.2. Sekcionisanje

To je jedan od najefikasnijih načina za ograničavanje struja kratkih spojeva i izvodi se u VN mrežama. Ograničenje u pogledu nivoa sekcionisanja podrazumeva da se ima određena sigurnost pogona. Što je mreža gušća to su struje kratkog spoja veće, ali je sigurnost pogona viša. Jako sekcionisana mreža znači male struje kratkog spoja ali relativno nisku sigurnost pogona i zbog toga treba naći optimalni kompromis. Sa gledišta investicija, sekcionisanje je veoma efikasan način za smanjivanje struja kratkog spoja jer ne zahteva dodatna ulaganja.

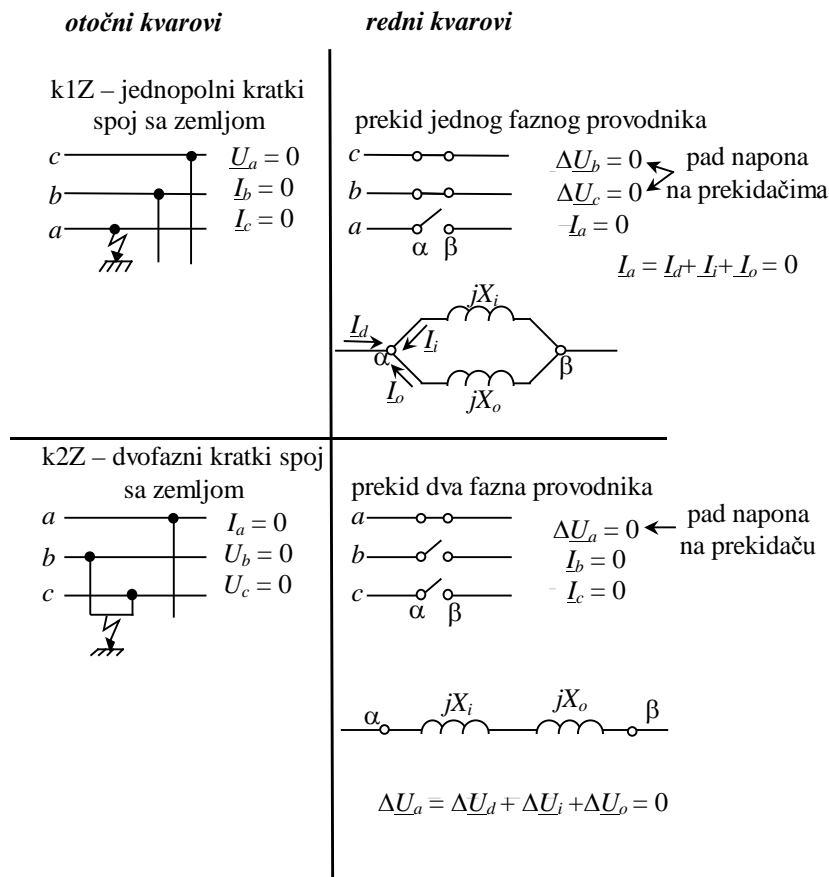
U našoj 110 kV-noj mreži, ako se ne radi nikakvo sekcionisanje, struje kratkog spoja su reda $15 \div 30$ kA. Ako se izvrši optimalno sekcionisanje, struje kratkog spoja se mogu smanjiti čak do 30%. Slični efekti se imaju i u 220 i 400 kV mreži. Komutaciona oprema u 110 kV mreži je za nivo struje kvara od 25 do 31,5 kA.

U slučajevima intenzivnog rasta mreže, struje kratkih spojeva mogu da prevaziđu nivoe struja kratkog spoja na koje je dimenzionisana komutaciona oprema. U takvim okolnostima trebalo bi preduzimati posebne mere za ograničavanje struja kratkog spoja ili podizati komutacionu opremu na viši nivo.

Sekcionisanjem se može uticati i na ukupne gubitke aktivne snage u mreži a takođe i na optimalno rasterećivanje pojedinih čvorišta.

12. Redne nesimetrije u EES

Redni kvarovi se u opštem slučaju mogu simulirati preko uvođenja redne nesimetrične impedanse. Nesimetrije prema zemlji ili nesimetrije koje podrazumevaju kontakt faznih provodnika međusobno, a koje su se interpretirale preko otočnih kvarova, ovde nisu od interesa.



Sl. 12.1 Analogija rednih i otočnih kvarova

Kod proučavanja rednih kvarova bitno je uočiti da kod njih postoje dve tačke kvara, tačke α i β , sl.12.1, između kojih se nalazi redna nesimetrija, dok se kod otočnih kvarova imala samo jedna tačka u kvaru. Ostatak sistema se predstavlja sa direktnim, inverznim i nultim komponentnim sistemom s tim da je nesimetrični deo mreže odeljen od ostatka sistema i nalazi se van njega.

Simetrični deo mreže, levo od tačke α i desno od tačke β , potrebno je ekvivalentirati sa direktnim, inverznim i nultim komponentnim sistemom primenom Theveninove teoreme u nešto proširenom smislu, pošto su u pitanju dve tačke kvara.

Poređenjem otočnih i rednih kvarova, zaključuje se da su oni međusobno dualni. Poznavajući dobro otočne kvarove, lako se grade relacije za redne kvarove, pisanjem dualnih jednačina. U praksi se najčešće dešava prekid jednog faznog provodnika, koji se lako vizualizuje u situaciji posle jednofaznog isključenja prekidača. Ovakav redni kvar, kod koga su direktni, inverzni i nulti komponentni sistem u potpunosti raspregnuti, relativno se lako može rešiti tehnikom koja je razvijena za otočne kvarove.

U opštem slučaju sistem simetričnih komponenti ne mora da bude potpuno raspregnut. Međutim, mnogi za praksu interesantni slučajevi mogu se interpretirati modelima u kojima je raspreganje komponentnih podsistema (direktnog, inverznog i nultog) potpuno i tako će u narednoj analizi biti postupljeno.

U EES mogu da se dogode sledeće vrste prekida:

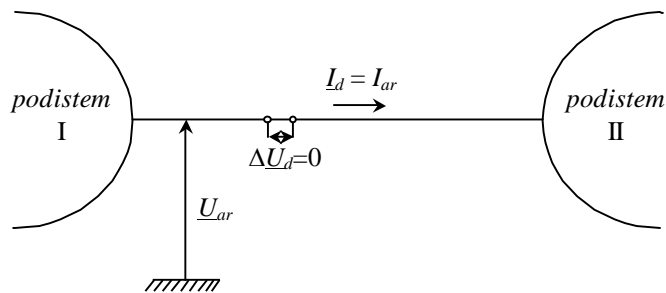
- prekid jednog faznog provodnika,
- prekid dva fazna provodnika,
- prekid sva tri fazna provodnika i
- prekid jednog ili više faznih provodnika i neutralnog provodnika u mrežama gde oneutralni (četvrti) provodnik postoji.

Prekid sva tri fazna provodnika predstavlja simetričan problem koji se lako rešava po analogiji sa trofaznim kratkom spojem.

12.1. Analiza rednih kvarova

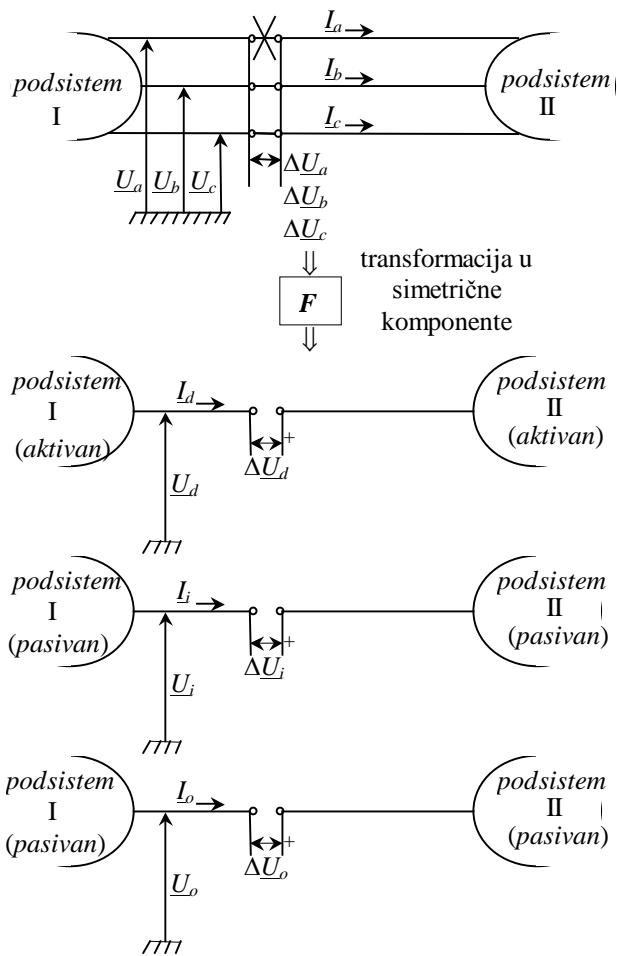
Za analizu rednih kvarova, izabran je primer sa jednim interkonektivnim vodom koji povezuje sisteme I i II s tim što će metod superpozicije biti korišćen na isti način kao kod otočnih kvarova. Podsistemi I i II, koji su po prirodi stvari simetrični,

možu a ne moraju da budu eksterno povezani. Na sl. 12.2 prikazano je normalno simetrično radno stanje, sa faznom radnom strujom faze a , I_{ar} , jednakoj direktnoj struji I_d i sa faznim radnim naponom faze a , $U_{ar}=U_{fr}$, jednakim takođe direktnoj komponenti napona pošto je sistem pre poremećaja po pretpostavci u simetričnom stanju.



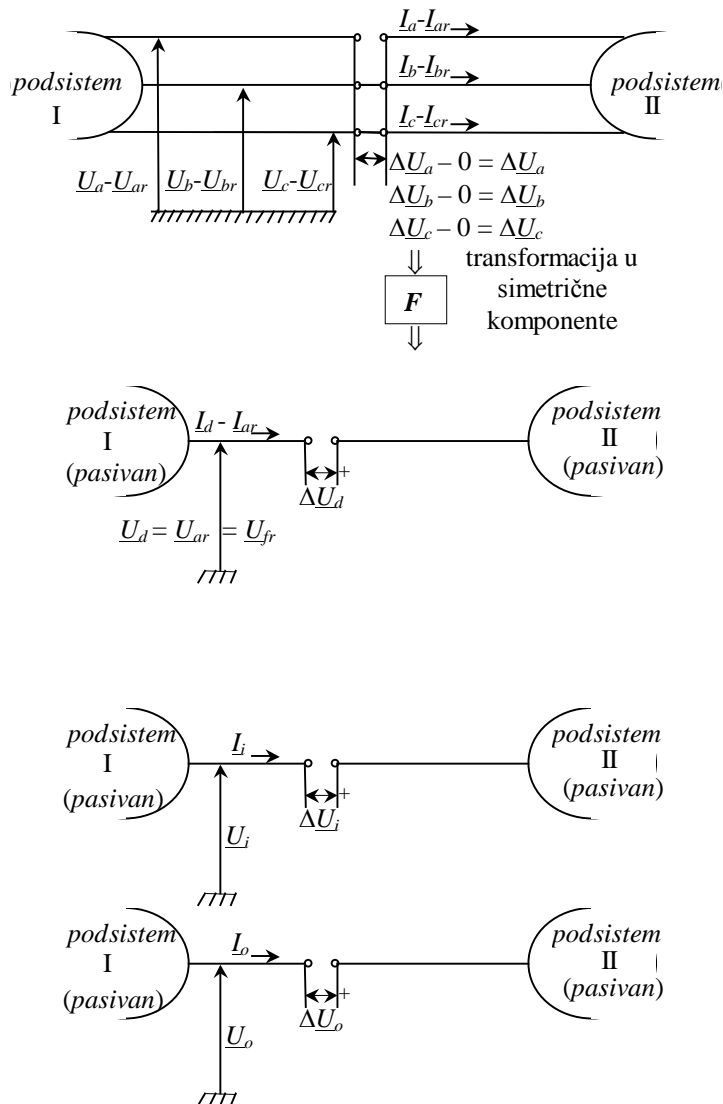
Sl. 12.2 Režim pre poremećaja

Režim posle poremećaja (pretpostavlja se prekid faze a) prikazan je na sl. 12.3, najpre u faznim koordinatama a zatim u koordinatama simetričnih komponenti.



Sl. 12.3 Režim posle poremećaja

Prema analogiji sa proračunima otočnih kvarova sada je potrebno odrediti pasivni sistem, koji superponiran na stanjem sa sl. 12.2 (normalnim radnim stanjem) daje stanje na sl. 12.3 (struje posle prekida). Drugim režimima, potrebno je odrediti režim koji superponiran sa radnim režimom daje rezultantni režim za vreme trajanja prekida. Taj režim je ilustrovan na sl. 12.4.



Sl. 12.4 Pasivni sistemi za analizu rednih kvarova

Na osnovu prethodnih ekvivalentnih šema mogu se pisati sledeće relacije:

$$\Delta U_d = (I_d - I_{ar})(Z_{dl} + Z_{dII}) = (I_d - I_{ar})Z_{d,ekv}^{red} \tag{12.1}$$

Gde su:

$Z_{d,ekv}^{red}$ - ekvivalentna impedansa direktnog redosleda gledana redno sa mesta prekida

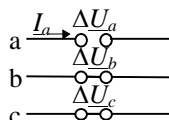
$Z_{i,ekv}^{red}$ - ekvivalentna impedansa direktnog redosleda gledana redno sa mesta prekida

$Z_{o,ekv}^{red}$ - ekvivalentna impedansa direktnog redosleda gledana redno sa mesta prekida

$$\begin{aligned} \Delta U_i &= I_i Z_{i,ekv}^{red} \\ \Delta U_o &= I_o Z_{o,ekv}^{red} \\ Z_{i,ekv}^{red} &= Z_{iI}^{red} + Z_{iII}^{red} \\ Z_{o,ekv}^{red} &= Z_{oI}^{red} + Z_{oII}^{red} \end{aligned} \tag{12.2}$$

Ukupna ekvivalentna impedansa direktnog redosleda gledana redno sa mesta prekida nalazi se kao zbir impedansi podsistema I i podsistema II. Potpuno je analogno sa inverznim i nultim redosledom.

U relacijama (12.2) ima se šest nepoznatih, 3 nepoznate struje (direktnog, inverznog i nultog redosleda) i 3 nepoznata napona (direktnog, inverznog i nultog redosleda). Dopunske jednačine se pišu na osnovu inspekcije mesta prekida (jednačine fizičke očiglednosti), sl. 12.5:



Sl. 12.5 Ilustracija prekida jednog faznog provodnika

Jednačine fizičke očiglednosti prema sl. 12.5 su:

$$\underline{I}_a = 0 \Rightarrow \underline{I}_d + \underline{I}_i + \underline{I}_o = 0 \quad (12.3)$$

$$\Delta \underline{U}_b = 0 \Rightarrow \underline{a}^2 \Delta \underline{U}_d + \underline{a} \Delta \underline{U}_i + \Delta \underline{U}_o = 0 \quad (12.4)$$

$$\Delta \underline{U}_c = 0 \Rightarrow \underline{a} \Delta \underline{U}_d + \underline{a}^2 \Delta \underline{U}_i + \Delta \underline{U}_o = 0 \quad (12.5)$$

Analogno kao kod analize dvofaznog kratkog spoja, na osnovu (12.4) i (12.5) sledi:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_d &= \Delta \underline{U}_i = \Delta \underline{U}_o \\ \underline{I}_d &= \frac{\Delta \underline{U}_d}{\underline{Z}_d} + \underline{I}_{ar} \\ \underline{I}_i &= \frac{\Delta \underline{U}_i}{\underline{Z}_{i,ekv}^{red}} \\ \underline{I}_o &= \frac{\Delta \underline{U}_o}{\underline{Z}_{o,ekv}^{red}} \\ \frac{\Delta \underline{U}_d}{\underline{Z}_{d,ekv}^{red}} &= \underline{I}_{ar} + \frac{\Delta \underline{U}_i}{\underline{Z}_{i,ekv}^{red}} + \frac{\Delta \underline{U}_o}{\underline{Z}_{o,ekv}^{red}} = 0 \end{aligned} \quad (12.6)$$

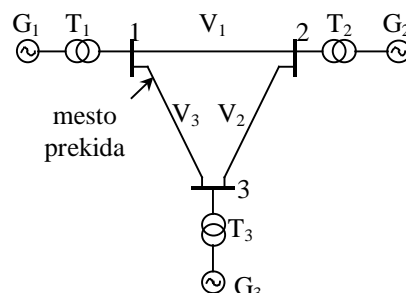
Vodeći računa o (12.3) sledi :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \underline{U}_d}{\underline{Z}_{d,ekv}^{red}} + \underline{I}_{ar} + \frac{\Delta \underline{U}_i}{\underline{Z}_{i,ekv}^{red}} + \frac{\Delta \underline{U}_o}{\underline{Z}_{o,ekv}^{red}} &= 0 \\ \Delta \underline{U}_d &= -\underline{I}_{ar} \frac{\underline{Z}_{d,ekv}^{red} \underline{Z}_{i,ekv}^{red} \underline{Z}_{o,ekv}^{red}}{\underline{Z}_d \underline{Z}_o + \underline{Z}_d \underline{Z}_i + \underline{Z}_i \underline{Z}_o} = -\underline{I}_{ar} \frac{\underline{Z}_{d,ekv}^{red} \underline{Z}_{i,ekv}^{red} \underline{Z}_{o,ekv}^{red}}{(\underline{Z}_{ekv}^{red})^2} \\ \underline{I}_d &= \underline{I}_{ar} \frac{\underline{Z}_{d,ekv}^{red} (\underline{Z}_{i,ekv}^{red} + \underline{Z}_{o,ekv}^{red})}{(\underline{Z}_{ekv}^{red})^2} \\ \underline{I}_i &= -\underline{I}_{ar} \frac{\underline{Z}_{d,ekv}^{red} \underline{Z}_{o,ekv}^{red}}{(\underline{Z}_{ekv}^{red})^2} \\ \underline{I}_o &= -\underline{I}_{ar} \frac{\underline{Z}_{d,ekv}^{red} \underline{Z}_{i,ekv}^{red}}{(\underline{Z}_{ekv}^{red})^2} \end{aligned} \quad (12.7)$$

12.2. Primer nalaženja reaktanse merene redno sa mesta prekida

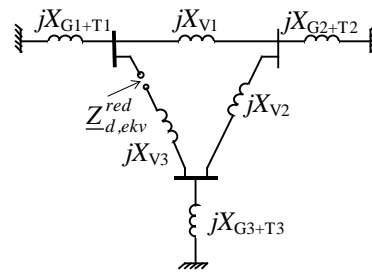
U prethodnim relacijama sa superskriptom *red* označene su ekvivalentne impedanse gledane redno sa mesta prekida.

~~Pošto je nalaženje impedanse (reaktanse) gledane redno sa mesta prekida netipičan zadatak to će on biti ilustrovan na primeru jednofazne šeme sistema sa tri generatora, sl. 12.6.~~



Sl. 12.6 Jednofazna šema tromašinskog sistema

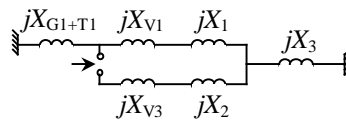
Uvažavajući samo reaktanse elemenata sistema dobija se ekvivalentna šema direktnog redosleda kao na sl. 12.7.



Sl. 12.7 Ekvivalentna šema sistema sa uvažanim reaktansama

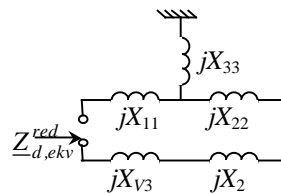
Mesto prekida je pretpostavljeno na vodu 3, neposredno u blizini sabirnica 1.

U cilju pojednostavljenja šeme najpre se trougao $[X_{V2}, X_{G2+T2}, X_{G3+T3}]$ transformiše u odgovarajuću zvezdu $[X_1, X_2, X_3]$:



Sl. 12.8 Ekvivalentna šema posle prve transfiguracije

Sada se trougao $[(X_{V1} + X_1), X_3, X_{G1+T1}]$ transformiše u zvezdu $[X_{11}, X_{22}, X_{33}]$:



Sl. 12.9 Ekvivalentna šema posle druge transfiguracije

Sa sl. 12.9 direktno se vidi da je redna reaktansa (reaktansa gledana redno sa mesta prekida) jednaka reaktansi koja se suprotstavlja struji koju u rednom kolu uspostavlja idealni strujni generator sa jediničnom strujom (lociran između tačaka prekida):

$$Z_{d,ekv}^{red} = j(X_{11} + X_{22} + X_2 + X_{V3})$$

Literatura:

- [1] A. Bergen: *Power Systems Analysis*, Prentice-Hall, 2000.
 - [2] G. Heydt: *Computer Analysis Methods for Power Systems*, Macmillan Publishing Company, New York, NY, 1986.
 - [3] C. A. Gross: *Power System Analysis*, John Wiley and Sons, 1986.
 - [4] D. Glover, M. Sarma: *Power System Analysis and Design*, PWS-KENT Publishing Company, Boston, MA, USA, 1986.
 - [5] C. Starr: *Global Energy and Electricity Futures*, IEEE Power Engineering Review, Aug 1991, Vol. 11, N^o 8, pp. 4÷9.
 - [6] A.V. Vaskoncelos: *EC Electricity Supply Industry*, IEEE Power Engineering Review, June 1993, Vol. 13, N^o 6, pp. 7÷10.
 - [7] European Electricity Supply Industry: *Demand and Generation Prospects to 2010*, Synopsis of the 1998 EURPROG Report.
 - [8] C.L. Wadhwa: *Electrical Power Systems*, Wiley Eastern Limited, New Delhi, India, 1983.
 - [9] G. Kusic: *Computer Aided Power Systems Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NY, USA, 1986.
 - [10] O.I. Elgerd: *Electrical Energy Systems Theory – An Introduction*, McGraw Hill, Inc., New York, NY, USA, 1982.
 - [11] P.M. Anderson: *Analysis of Faulted Power Systems*, The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 1973.
 - [12] Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, *A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No. 2, May 1988, pp. 753- 762.
 - [13] T. Gönen: *Electrical Transmission System Engineering – Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 1998.
 - [14] J. Areilaga, C.P. Arnold, B.J. Harker: *Computer Modeling of Electrical Power Systems*, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, USA, 1963.
 - [15] P. Kundur: *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, New York, NY, USA, 1994.
 - [16] B.A. Веников:
 - [17] Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин: *Енергетические системи*
 - [18] M.H. El-Hawary: *Electrical Power Systems Design and Analysis*, Reston Publishing Company, Prentice Hall Co., Rston, Wa, USA, 1983.
 - [19] W.D. Stevenson: *Elements of Power System Analysis*, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1982.
 - [20] A.E. Guile, W. Paterson: *Electrical Power Systems*, Volume One and Two, Pergamon Press, Oxford, U.K., 1986.
 - [21] A. Debs: *Modern Power Systems Control and Operation*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 1988
 - [22] E.W. Kimbark: *Power Systems Stability*, Volume III, John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 1956.
 - [23] M.A. Pai: *Computer Techniques in Power System Analysis*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi, India, 1979.
 - [24] G.W. Stagg, A.H. El-Abaid: *Computer Methods in Power System Analysis*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1968.
 - [25] T.J.E. Miller: *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 1982.
 - [26] P.S.R. Murty: *Power System Operation and Control*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi, India, 1989.
 - [27] *Studija kompenzacije reaktivne snage u distributivnim preduzećima Elektroprivrede Srbije – I faza*, Institut “Nikola Tesla” i Elektrotehnički Fakultet Beograd, Beograd, 1996.
 - [28] M.B. Đurić: *Elementi EES-a*, Beopres, Beograd, 1995.
 - [29] B. Reljin: *Analiza trofaznih električnih kola*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1997.
 - [30] R. Pelissier: *Les reseaux d'énergie électrique*, Dunod, Paris, France, 1975.
-