

Poglavlje 5

Mešovite mreže

5.1 Kombinovana metoda rešavanja mešovitih mreža

Kod proračuna sklopnih prenapona pogodno je vodove zameniti raspoređenim parametrima, na kojima se proračun radi primenom putujućih talasa, a ostali elementi se zamenjuju koncentrisanim parametrima, posebno ako su amplitudno nelinearni. Ovo se odnosi na modele nelinearnih karakteristika magnećenja transformatora, kao i odvodnike prenapone i eventvano nelinearne modele električnog luka u prekidačima.

Prilikom proračuna sklopnih prenapona u elektroenergetskim sistemima po pravilu se proračuni rade trofazno. Izuzetak su slučajevi kada se rade edukativni primeri ili se vrši modelovanje procesa u mrežama koje nisu trofazne.

Mešovita mreža je ona koja sadrži elemente sa koncentrisanim parametrima i elemente sa raspodeljenim parametrima. Za mešovite mreže vezan je pojam zajedničkog čvora. Čvor je zajednički ako se čvor koncentrisane mreže poklapa sa čvorom raspodeljene mreže. Prilikom proračuna sklopnih prenapona pogodnije je primenjivati modele mešovitih mreža, mada se mogu pri približnim proračunima koristiti samo modeli mreža sa raspoređenim parametrima ili samo modeli mreža sa koncentrisanim parametrima.

Kada se modeluju vodovi, tada je pogodno vršiti transformaciju trofaznog sistema u komponentne sisteme. Razlaganje na komponentne sisteme omogućava jednostavno modelovanje frekvencijski zavisnih karakteristika u nultom komponentnom sistemu koji obuhvata povratni put kroz zemlju. Karakteristike povratnog puta kroz zemlju su različita brzina prostiranja i različito frekvencijski zavisno prigušenje talasa koji se prostiru po nultom komponentnom sistemu od talasa koji se prostiru samo po fazama. Za modelovanje prelaznih procesa pogodnija je transformacija u α , β i 0 komponente, jer su elementi matrica transformacija realni brojevi. Za rešavanje ustaljenih stanja mogu se koristiti

matrice sa realnim brojevima, kao i simetrične komponente sa kompleksnim brojevima.

Kada su u pitanju nelinearni i nestacionarni elementi, tada je jednostavnije da se svi proračuni rade u trofaznom sistemu. Na primer, postepeno isključivanje pojedinih polova prekidača modeluje se prekidanjem pojedinih grana u trofaznom kolu, što je znatno složenije kada se vrši transformacija u komponentne sisteme.

5.2 Metoda kompenzacije

Pri rešavanju mešovitih mreža koristi se metoda kompenzacije. Po ovoj metodi može se ukloniti jedan ili više elemenata, a njihov uticaj se obuhvata generatorom takvih karakteristika da se režim u kolu posle kompenzacije ne razlikuje od režima u prvobitnoj mreži. Po ovoj metodi uticaj delova mreže sa koncentrisanim parametrima na delove mreže sa raspodeljenim, i obrnuto, obuhvata se ekvivalentnim generatorima koji se priključuju u zajedničkim čvorovima. U složenoj mreži može biti više zajedničkih čvorova, u kojima se spajaju mreže sa raspoređenim i mreže sa koncentrisanim parametrima.

Prilikom proračuna mešovite mreže, u svakom koraku proračuna se određuju ekvivalentni generatori u zajedničkim čvorovima. Ukoliko se vrše analize sklopnih prenapona u trofaznim mešovitim mrežama, potrebno je izvršiti transformaciju trofaznih veličina u komponente sistema u svim zajedničkim čvorovima. Ekvivalentni generatori u mrežama sa raspoređenim parametrima su u komponentnim sistemima. Inverznom transformacijom se određuju generatori u faznim koordinatama, kojima se obuhvata uticaj raspodeljenog dela mreže na deo mreže sa koncentrisanim parametrima.

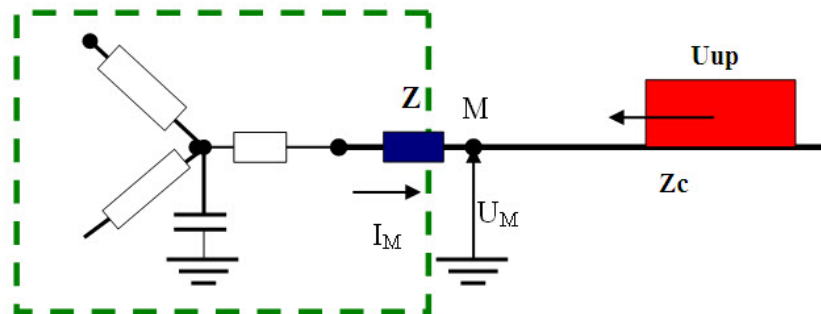
Razlikujemo dva tipa zajedničkih čvorova:

1. Zajednički čvor sa priključenom rednom impedansom Z , koja je najčešće induktivni kalem ili redna veza induktivnog kalema i otpornika (model generatora, transformatora ili zajednička induktivna grana koja modeluje blok generator-transformator).
2. Zajednički čvor sa priključenom otočnom granom prema zemlji (najčešće kapacitet sabirnica ili ekvivalentna kapacitivnost namotaja transformatora).

5.2.1 U zajedničkom čvoru sa strane koncentrisane mreže vezana je induktivna grana

Na slici 5.1 prikazan je slučaj kada je u tački u kojoj se vod predstavljen raspoređenim parametrima spaja sa delom mreže u kojoj je element priključen u zajednički čvor M

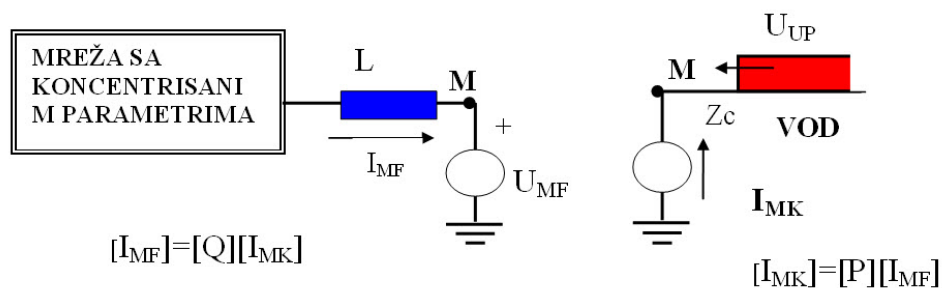
induktivna grana, predstavljena matricom impedansi $[Z]$ 3 x 3 sopstvenih i međufaznih induktiviteta i rednih otpornosti usled gubitaka.



Slika 5.1: Zamenska šema mreže u kojoj se deo mreže predstavljen koncentrisanim parametrima spaja rednom granom sa vodom predstavljenim raspoređenim parametrima u zajedničkom čvoru

Mreža se može podeliti na deo mreže modelovan koncentrisanim parametrima i deo mreže modelovan preko vodova.

Na slici 5.2 prikazana je mreža sa slike 5.1 kod koje je izvršeno razdvajanje mreža i primenjen princip kompenzacije.



Slika 5.2: Ekvivalentna šema kod koje je izvršeno razdvajanje mreža i primenjen princip kompenzacije

Uticaj jednog dela mreže na drugi se modeluje metodom kompenzacije, odnosno priključivanjem idealnog naponskog, odnosno strujnog izvora. Rešavanjem mreže sa koncentrisanim parametrima u trenutku t dobija se tročlani vektor faznih struja $[I_{MF}]$ kroz redni elemenat mreže sa koncentrisanim parametrima koji je vezan za zajednički čvor M. Transformacijom u komponentne sisteme dobija se tročlani vektor struja idealnog strujnog generatora u mreži sa raspoređenim parametrima $[I_{MK}]$ u komponentnim sistemima. Proračunom prelaznog režima u mreži sa vodovima metodom putujućih talasa dobijaju se upadni naponi u komponentnim sistemima koji dolaze u zajednički čvor M, u kome

se izračunava napon u komponentnim sistemima $[U_{MK}]$, koji posle transformacije u fazne koordinate predstavlja napon idealnog naponskog izvora u $[U_{MF}]$ u faznim koordinatama u čvoru M u mreži sa koncentrisanim parametrima. Napon u zajedničkom čvoru M se izračunava iz izraza 5.2 u mreži sa raspoređenim parametrima, gde je data i transformacija napona iz komponentnih u fazne koordinate:

$$[U_{MK}] = 2 \cdot [U_{up}] - [Z_c \cdot I_{MK}] \quad (5.1)$$

$$[U_{MF}] = [Q] \cdot [U_{MK}] \quad (5.2)$$

gde su:

$[U_{MK}]$ - vektor komponentnih napona u zajedničkom čvoru M koji se transformiše u fazne napone $[U_{MF}]$,

$[U_{MF}]$ - vektor faznih napona u zajedničkom čvoru M, koji se koristi u mreži sa koncentrisanim parametrima kao izvor na osnovu koga se određuje vektor struja $[I_{MF}]$ za sledeći korak, sve izraženo u faznim koordinatama,

$[U_{up}]$ - vektor upadnih komponenti napona u komponentnim sistemima, koji nailazi po vodovima u čvor M,

$[Z_c]$ - dijagonalna matrica karakterističnih impedansi voda u komponentnim sistemima,

$[I_{MF}]$ - vektor struja izračunat u mreži sa skoncentrisanim parametrima, koja se koristi kao strujni izvor u mreži sa raspodeljenim parametrima u komponentnim sistema $[I_{MK}]$ nakon transformacije,

$[Q]$ - matrica transformacije iz komponentnih u fazne veličine, prema 4.23, na strani 129,

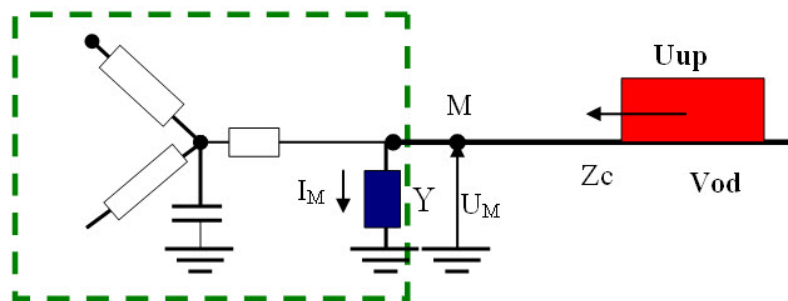
$[P]$ - matrica transformacije iz faznih u komponentne u veličine, prema 4.22,

Vektori trenutnih vrednosti faznih napona, komponentnih napona, faznih struja i komponentnih struja imaju sledeći oblik:

$$[U_{MF}] = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}, [U_{MK}] = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_o \end{bmatrix}, [I_{MF}] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, [I_{MK}] = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

5.2.2 U zajedničkom čvoru sa strane koncentrisane mreže priključena kapacitivna grana

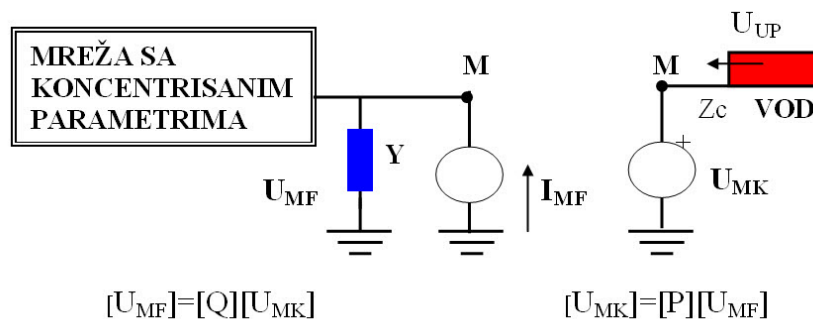
Na slici 5.3 prikazana je kompletna mreža kod koje je u zajedničkom čvoru M priključena u delu mreže sa koncentrisanim parametrima otočno prema zemlji kapacitivna grana predstavljena admitansom Y . Ova grana može da bude sastavljena od dve paralelne grane, kondenzatora i omske odvodnosti.



Slika 5.3: Kompletna mreža kod koje je u zajedničkom čvoru priključena otočna admitansa prema zemlji

Na slici 5.3 admitansa $[Y]$ predstavlja matricu 3×3 sopstvenih i međusobnih kapacitivnosti i odvodnosti.

Na slici 5.4 prikazane su razdvojene podmreže sa koncentrisanim parametrima i deo mreže sa raspoređenim parametrima, u kojima ekvivalentni generatori u potpunosti zamenjuju deo mreže koji reprezentuju.



Slika 5.4: Razdvojene mreže sa koncentrisanim i raspoređenim parametrima, sa idealnim izvorima koji kompenzuju drugi deo mreže, sa otočnom skoncentrisanom impedansom (kondenzatorom) vezanom u zajedničkom čvoru

Vektor struja strujnog izvora u faznim koordinatama u mreži sa koncentrisanim parametrima $[I_{MF}]$ izračunava se na osnovu struje na vodu koji je vezan za čvor M u mreži

sa raspoređenim parametrima $[I_{MK}]$ u komponentnim sistemima na osnovu izraza:

$$[I_{MK}] = \frac{[U_{MK}] - 2 \cdot [U_{up}]}{Z_c} \quad (5.4)$$

$$[I_{MF}] = [P] \cdot [I_{MK}] \quad (5.5)$$

U izrazu 5.5 sve veličine predstavljaju vektore sa po 3 elementa. Matrica $[Z_c]$ predstavlja dijagonalnu matricu 3x3 karakterističnih impedansi u komponentnim sistemima, oblika:

$$[Z_c] = \begin{bmatrix} Z_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & Z_\beta & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Napon na kondenzatoru $[U_{MF}]$ u faznim koordinatama se izračunava u kolu sa koncentrisanim parametrima rešavanjem diferencijalnih jednačina. Po pravilu admitansa ima kapacitivni karakter ili se može predstaviti kao paralelna veza kondenzatora kapaciteta C i omske provodnosti G . Naponi na kondenzatorima prema zemlji $[U_{MF}]$ se dobija rešavanjem jednačina stanja. Transformacijom vektora $[U_{MF}]$ u komponentne sisteme dobija se napon u mreži sa raspoređenim parametrima u komponentnim sistemima $[U_{MK}]$ na osnovu koga se određuju odbijene komponente iz čvora M .

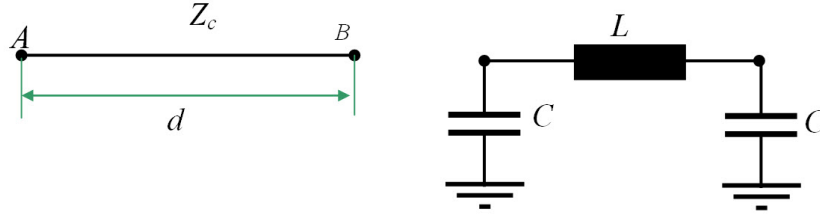
5.3 Određivanje ustaljenog stanja

Prilikom proračuna sklopnih prenapona pojavljuje se potreba da se vrši proračun kada mreža iz jednog stacionarnog prostoperiodičnog stanja prelazi u drugo operacijom sklopnih aparata. Proračunom ustaljenog stanja se određuju početni uslovi za proračun prelaznog režima. Pri određivanju početnih uslova, potrebno je sve vodove zameniti ekvivalentnom šemom sa koncentrisanim parametrima.

5.3.1 Zamena vodova koncentrisanim elementima

Pri rešavanju ustaljenog stanja svi vodovi se zamenjuju koncentrisanim parametrima, na taj način što se pravi II ekvivalent posmatrane deonice voda. Podužni induktivitet voda se množi sa dužinom i dobija koncentrisan induktivitet, a podužna kapacitivnost voda pomnožena sa polovinom dužine predstavlja se kao koncentrisana kapacitivnost na svakom od krajeva voda, kao na slici 5.5.

Osnovni parametri vodova na osnovu kojih se dobijaju koncentrisani parametri su:



Slika 5.5: Pretvaranje voda predstavljenog raspoređenim parametrima i II šemu sa koncentrisanim parametrima

$Z_c = \sqrt{l/c}$ - karakteristična impedansa nadzemnog voda (Ω),

$v_c = 1/\sqrt{l c}$ - brzina prostiranja talasa u vakuumu, $v_c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s,

$v_k = 1/\sqrt{l_k c_k}$ - brzina prostiranja talasa po kablovima,

l_k, c_k - podužni induktivitet i kapacitet kablova,

$v_r = v_k/v_c$ - relativna brzina prostiranja u odnosu na brzinu prostiranja u vakuumu u relativnim jedinicama (rj),

d - dužina voda (m).

Koncentrisana kapacitivnost C i induktivnost L sa slike 5.5 dobijaju se iz izraza:

$$\begin{aligned} L &= \frac{Z_c}{v_c \cdot v_r} \cdot d \\ C &= \frac{1}{Z_c \cdot v_c} \cdot d \end{aligned} \quad (5.7)$$

Modeli vodova za rešavanje stacionarnog stanja se formiraju u komponentnim sistemima. Moguće je koristiti simetrične komponente ili transformacije sa realnim matricama kao na primer $\alpha, \beta, 0$. Postoji značajna razlika u karakteristikama između direktnog odnosno α i nultog komponentnog sistema. Međutim, direktni i inverzni sistem, odnosno α i β sistem se smatraju identičnim (sem kada se u mreži nalaze obrtne mašine). Kod određivanja ustaljenog stanja za izračunavanje početnih uslova se ne koriste tačnije transformacije trofaznih veličina u komponentne sisteme koje obuhvataju razlike u podužnim parametrima pojedinih faza vodova najviših napona kada se ne vrši transpozicija faza. Upotreba modalnih transformacija u komponentne sisteme bi bilo komplikovano, a ne bi se mogla postići velika tačnost jer je već uvedena aproksimacija pri zameni vodova koncentrisanim parametrima. Koncentrisane kapacitivnosti i induktivnosti dobijene na ovaj način postaju deo mreže sa koncentrisanim parametrima u komponentnim sistemima. Pri proračunu ustaljenih režima koriste se sledeća uprošćenja:

- zanemaruje se podužna promena napona i struja kod dužih vodova,

- Zanemaruje se efekat produženog vremena prostiranja kod modelovanja nulte komponente voda zbog povratnog puta kroz zemlju,
- posmatraju se samo idealno transponovani vodovi kod kojih su α i β parametri međusobno jednaki, samo se nulti sistem razlikuje. To omogućava jednostavne transformacije u komponentne sistema pomoću simetričnih i cikličnih matrica transformacije.

Zbog nedovoljno tačnog modelovanja početnih uslova se može pojaviti prelazni proces u trenutku početka proračuna prelaznog režima. Taj problem se rešava na taj način što se nakon početka proračuna odlaže početak registracije rezultata dok se prelazni proces ne priguši.

5.3.2 Simetrično ustaljeno stanje

Proračun prelaznog režima u delu mreže sa koncentrisanim parametrima se sprovodi u trofaznom sistemu. Kada se rešava ustaljeno stanje mreže sa koncentrisanim elementima u koju su dodati i vodovi zamenjeni odgovarajućim koncentrisanim parametrima u vidu Π šeme, tada se proračun radi u komponentnim sistemima. To omogućava simulaciju ustaljenog režima sa kvarovima. Ustaljeno stanje koje predhodi prelaznom procesu može biti simetrično i nesimetrično.

Na osnovu matričnog oblika jednačina stanja u generalnom obliku koje su prikazane u izrazu 2.32, može se napisati kompleksni izraz koji opisuje ustaljeno simetrično stanje na taj način što se elementi matrica koji se množe izvodom električnih veličina kod jednačina stanja pretvaraju u elemenat pomnožen sa kompleksnom kružnom učestanošću $j\omega$. Izraz 5.8 napisan je za ustaljeni režim, pa se vrednosti elemenata odnose na direktni sistem ili α komponentni sistem u zavisnosti koja se trofazna transformacija sprovodi.

$$\begin{bmatrix} G + j\omega C & K \\ -K^T & R + j\omega L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{E} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

U izrazu 5.8 oznake imaju sledeće značenje:

$[G + j\omega C]$ -submatrica kompleksnih admitansi svih elemenata sistema,

$[R + j\omega L]$ - submatrica kompleksnih impedansi svih elemenata sistema,

$[K]$ -submatrica veza između kapacitivnih i induktivnih elemenata. Elementi matrice $[K]$ imaju vrednosti samo ± 1 ili 0 u zavisnosti od strukture grafa mreže.

$[\underline{U}, \underline{I}]$ -kompleksni naponi i struje koji se dobijaju rešavanjem ovog sistema jednačina.

$[E]$ - vektor kompleksnih ems svih generatora u sistemu.

Pošto je sistem simetričan, rešavanje se vrši samo u direktnom komponentnom sistemu. Ukoliko se radi u sistemu $\alpha, \beta, 0$ transformacije, veličine u β sistemu su samo fazno pomerene za 90° u odnosu na α sistem. Pri simetričnom stanju u nultom sistemu naponi i struje su 0, dok se kod nesimetričnog stanja primenjuje princip superpozicije.

Izračunavanje nepoznatih kompleksnih napona i struja u simetričnom režimu vrši se rešavanjem sistema jednačina u kompleksnom obliku 5.8 inverzijom matrice kompleksnih elemenata sistema.

$$\begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G + j\omega C & K \\ -K^T & R + j\omega L \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{E} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

5.3.3 Princip superpozicije pri analizi kratkih spojeva

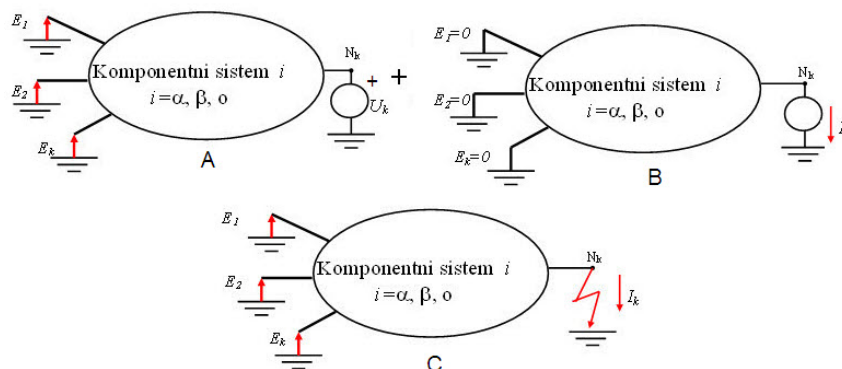
Proračun kratkih spojeva po principu superpozicije radi se na sledeći način:

- Odredi se ustaljeno stanje u mreži u kojoj nema kvara i odredi napon na mestu kvara $\underline{U}_k$ kada kvara ne bi bilo (slika A).
- Odredi se ustaljeno stanje u mreži u kojoj su svi izvori napravljeni pasivnim (elektromotorne sile su proglašene da su nula), a na mestu kvara se nalazi ekvivalentan strujni izvor koji izaziva proticanje struja kvara po granama mreže kao pri kratkom spoju (slika B).
- Superpozicijom ova dva stanja dobija se sistem sa kvarom, kod koga se naponi na mestu kvara poništavaju, a elektromotorna sila svih izvora izaziva struje kvara (slika C).

Na slici 5.6 je ilustrovan način određivanja parametara ustaljenog režima pri nesimetričnom režimu primenom principa superpozicije:

5.3.4 Nesimetrični režimi za pojedine tipove kvarova

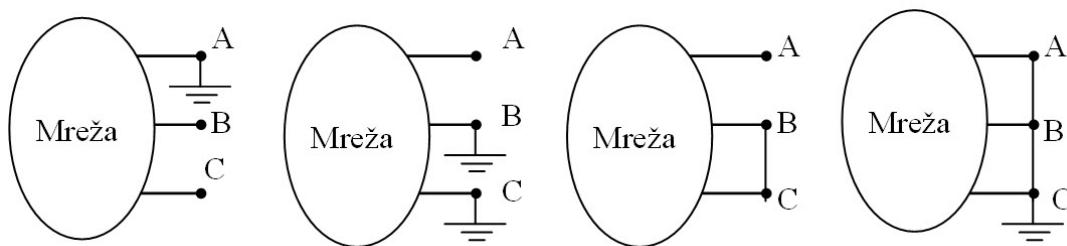
U slučaju da je sistem pre operacije koja je izaziva prelazni režim, bio u ustaljenom režimu sa nesimetričnim kvarom, tada parametri tog režima definišu početne uslove za dalji proračun trenutnih napona i struja. Da bi se proračun obavio primenom $\alpha, \beta, 0$ transformacije pojednostavio, razmatraju se samo određeni tipovi kvarova:



Slika 5.6: Princip superpozicije pri određivanju režima za vreme kvara

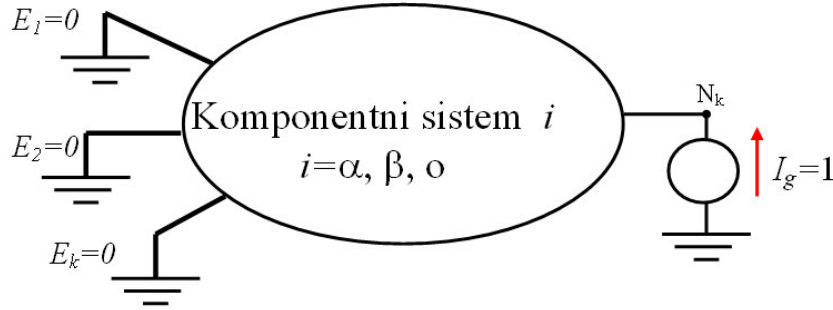
1. jednopolni spoj sa zemljom faze A,
2. dvopolni kratak spoj faza B i C,
3. dvopolni kratak spoj faza B i C sa zemljom,
4. trofazni kratak spoj.

Svi ostali tipovi kvarova se mogu svesti na predhodne jednostavnom prenumeracijom faza. Umesto $\alpha, \beta, 0$ transformacije mogu se koristiti i simetrične komponente, stim što bi se struje kvarova u pojedinim komponentnim sistemima na različit način izračunavale. Na slici 5.7 prikazani su tipovi kvarova koji se razmatraju.



Slika 5.7: Tipovi nesimetričnih kvarova koji se razmatraju u ustaljenom stanju

Za rešavanje nesimetričnih režima potrebno je poznavati ekvivalentnu impedansu sistema merenu očno sa mesta kvara u α i nultom komponentnom sistemu. Proračun ovih impedansi vrši se priključivanjem jediničnog strujnog generatora čija je amplituda struje $I_g = 1$ na sistem koji je učinjen pasivnim kao na slici 5.8. Smatra se da su karakteristike pasivnih elemenata mreža u α i β komponentnim sistemima identične i zbog toga se račun sprovodi sa pojednostavljenjem da je $Z_\beta = Z_\alpha$. Sistem se pravi pasivnim tako što su svi generatori premošćeni i uzemljeni.



Slika 5.8: Određivanje ekvivalentne impedanse sistema merene očno sa mesta kvara

Dobijanje ekvivalentne impedanse merene očno sa mesta kvara svodi se na rešavanje sistema:

$$\begin{bmatrix} G_i + j\omega C_i & K \\ -K^T & R_i + j\omega L_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_i \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ za } i = \alpha, 0 \quad (5.10)$$

gde je $\underline{1}$ vektor struja strujnih izvora čiji su svi elementi jednaki 0, osim elementa koji odgovara čvoru sa kvarom N_K , koji je jednak 1.

Impedansa α sistema brojno je jednaka naponu u čvoru sa kvarom N_K u α sistemu pri delovanju jedinične struje, odnosno:

$$\underline{Z}_\alpha = \frac{\underline{U}_{N_\alpha}}{\underline{I}_\alpha} = \underline{U}_{N_\alpha} \text{ za } \underline{I}_\alpha = 1 \quad (5.11)$$

Na isti način se dobija ekvivalentna impedansa nultog sistema:

$$\underline{Z}_o = \frac{\underline{U}_{N_o}}{\underline{I}_o} = \underline{U}_{N_o} \text{ za } \underline{I}_o = 1 \quad (5.12)$$

Jednopolni kvar prema zemlji

Uslovi na mestu kvara koji vladaju u slučaju jednopolnog kvara na fazi A su:

$$\begin{aligned} U_A &= 0 \\ I_B &= 0 \\ I_C &= 0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

Ako se napon faze A izrazi preko komponentnih napona u α , β i 0 komponentama, dobija se:

$$U_A = U_\alpha + U_0 = 0 \quad (5.14)$$

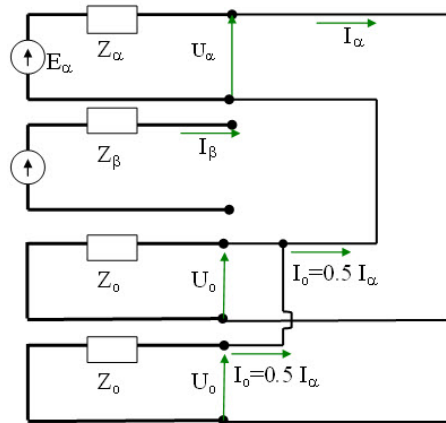
Ako se struje faza B i C izraze preko komponentnih struja u α , β i 0 komponentama, dobija se:

$$\begin{aligned} I_B &= -\frac{1}{2}I_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta + I_0 = 0 \\ I_C &= -\frac{1}{2}I_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta + I_0 = 0 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Iz izraza 5.14 i 5.15 dobijaju se sledeći odnosi:

$$\begin{aligned} U_\alpha + U_0 &= 0 \\ I_\alpha &= 2I_0 \\ I_\beta &= 0 \end{aligned} \quad (5.16)$$

Sprega ekvivalentnih šema u komponentnim sistemima za izračunavanje struje kvara data je na slici 5.9. Na slici je α komponentni sistem vezan na red sa dva nulta komponentna sistema u paraleli.



Slika 5.9: Sprega komponentnih sistema za izračunavanje struje jednopolnog kvara na fazi A

U slučaju jednopolnog kvara struja kvara u komponentnim sistemima se može izračunati na osnovu izraza:

$$\begin{aligned} I_\alpha &= \frac{U_{k\alpha}}{\underline{Z}_\alpha + 0.5 \cdot \underline{Z}_o} \\ I_\beta &= 0 \\ I_o &= I_\alpha / 2 \end{aligned} \quad (5.17)$$

Oznaka $\underline{U}_{k\alpha} = \underline{E}_\alpha$ je kompleksni napon koji bi vladao na mestu kvara, kada kvara ne bi bilo. Ovaj napon se dobija rešavanjem sistema jednačina 5.9.

Struje u faznim koordinatama se dobijaju inverznom transformacijom iz komponentnih sistema u fazne koordinate. Kad se izračunaju kompleksne struje na mestu kvara, dobija se:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \frac{3\underline{U}_{k\alpha}}{(2\underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_o) \\ \underline{I}_B &= 0 \\ \underline{I}_C &= 0\end{aligned}\tag{5.18}$$

Dvopolni kratak spoj bez zemlje

Uslovi na mestu kvara koji vladaju u slučaju dvopolnog kvara na fazama B i C su:

$$\begin{aligned}I_A &= 0 \\ I_B &= -I_C\end{aligned}\tag{5.19}$$

$$U_B = U_C\tag{5.20}$$

Ako se struja faze A izrazi preko komponentnih struja u α , β i 0 komponentama, dobija se:

$$I_A = I_\alpha + I_0 = 0\tag{5.21}$$

Kako je kratak spoj bez zemlje, $I_0 = 0$, sledi iz 5.21 da mora i $I_\alpha = 0$. Ako se struje faza B i C izraze preko komponentnih struja u α , β i 0 , dobija se, vodeći računa o predhodnom zaključku:

$$\begin{aligned}I_B &= \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta \\ I_C &= -\frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta\end{aligned}\tag{5.22}$$

Ako se fazni naponi na fazama B i C izraze preko komponentnih, dobija se:

$$\begin{aligned}U_B &= -\frac{1}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta + U_0 \\ U_C &= -\frac{1}{2}U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta + U_0\end{aligned}\tag{5.23}$$

Može zaključiti iz 5.23 da je $U_\beta = 0$ da bi $U_B = U_C$. Struje kvara u komponentnim sistemima su:

$$\begin{aligned} I_\alpha &= 0 \\ \underline{I}_\beta &= \frac{\underline{U}_{k\beta}}{\underline{Z}_\beta} \\ I_0 &= 0 \end{aligned} \quad (5.24)$$

gde je:

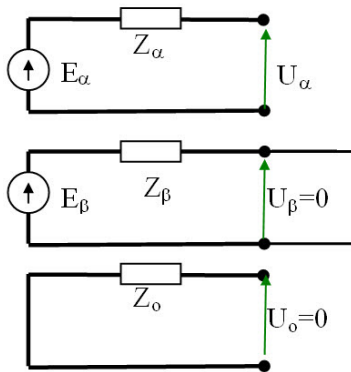
$$\underline{U}_{k\beta} = \underline{E}_\beta \quad (5.25)$$

$$\underline{E}_\beta = E_\alpha e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (5.26)$$

$$\underline{Z}_\beta = \underline{Z}_\alpha \quad (5.27)$$

$$(5.28)$$

Na slici 5.10 prikazana je sprega komponentnih sistema na osnovu kojih se računa struja na mestu kvara.



Slika 5.10: Šema spoja komponentnih sistema za dvofazni kvar bez zemlje

Kompleksne struje u faznim koordinatama su

$$\begin{aligned} I_A &= 0 \\ \underline{I}_B &= \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\underline{E}_\beta}{\underline{Z}_\beta} \end{aligned} \quad (5.29)$$

$$\underline{I}_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\underline{E}_\beta}{\underline{Z}_\beta} \quad (5.30)$$

$$(5.31)$$

gde je:

$$\underline{E}_\beta = E_\alpha e^{j\frac{\pi}{2}}$$

$$\underline{Z}_\beta = \underline{Z}_\alpha \quad (5.32)$$

$$(5.33)$$

Dvopolni kratak spoj sa zemljom

U slučaju dvopolnog kratkog spoja sa zemljom uslovi na mestu kvara mogu se opisati sledećim izrazima u faznim koordinatama.

$$\underline{I}_A = 0$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_C \quad (5.34)$$

$$\underline{U}_B = 0 \quad (5.35)$$

$$\underline{U}_C = 0 \quad (5.36)$$

$$(5.37)$$

Ako se struja faze A izrazi preko komponentnih struja u α , β i 0 sistemu, dobija se:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_\alpha + \underline{I}_0 = 0 \quad (5.38)$$

odakle sledi da je:

$$\underline{I}_\alpha = -\underline{I}_0 \quad (5.39)$$

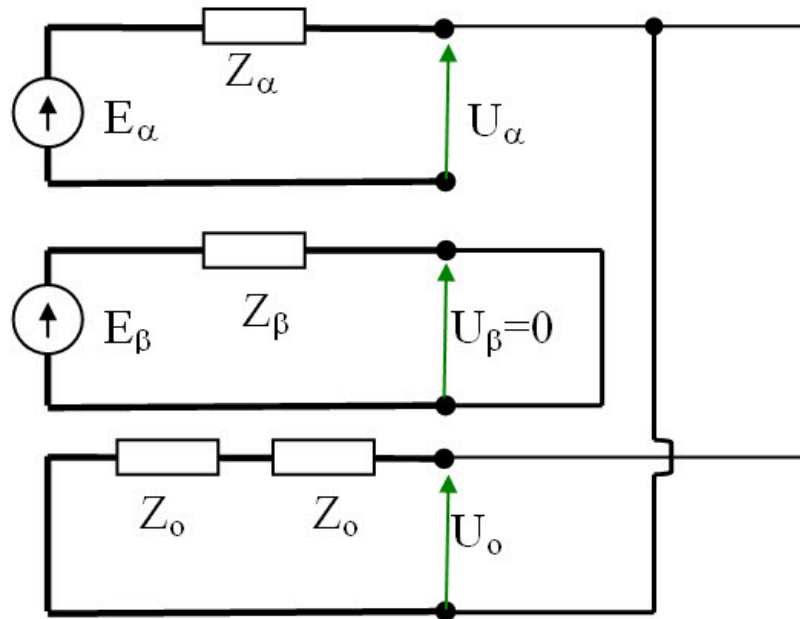
Ako se fazni naponi na fazama B i C izraze preko komponentnih, dobija se:

$$\begin{aligned} \underline{U}_B &= -\frac{1}{2}\underline{U}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{U}_\beta + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_C &= -\frac{1}{2}\underline{U}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{U}_\beta + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_B &= 0 \\ \underline{U}_C &= 0 \end{aligned} \quad (5.40)$$

Na isti način kao i u slučaju kratkog spoja faza B i C bez zemlje, iz 5.23 se može iz izraza 5.40 može zaključiti da je napon u β komponentnom sistemu na mestu kvara $\underline{U}_\beta = 0$. Odatle sledi da je:

$$\underline{U}_\alpha = 2\underline{U}_0 \quad (5.41)$$

Na osnovu izraza 5.39 i 5.41 može se nacrtati sprega ekvivalentnih šema u komponentnim sistemima na mestu kvara.



Slika 5.11: Šema spoja komponentnih sistema za dvofazni kvar sa zemljom

Veze između napona i struja u faznim koordinatama i komponentnim veličinama na mestu kvara dati su relacijama:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_\alpha &= \frac{\underline{U}_{k\alpha}}{2 \cdot \underline{Z}_o + \underline{Z}_\alpha} \\
 \underline{I}_\beta &= \frac{\underline{U}_{k\alpha} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}}{\underline{Z}_\alpha} \\
 \underline{I}_o &= -\underline{I}_\alpha
 \end{aligned} \tag{5.42}$$

Fazne struje na mestu kvara imaju sledeće vrednosti:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_A &= 0 \\
 \underline{I}_B &= -\frac{\underline{U}_{k\alpha}}{2 \cdot \underline{Z}_o + \underline{Z}_\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\underline{U}_{k\alpha} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}}{\underline{Z}_\beta}
 \end{aligned} \tag{5.43}$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_{k\alpha}}{2 \cdot \underline{Z}_o + \underline{Z}_\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\underline{U}_\beta \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}}{\underline{Z}_\beta} \tag{5.44}$$

$$\tag{5.45}$$

Tropolni kratak spoj sa ili bez zemlje

Povezanost struja na mestu kvara u ovom slučaju definisana je sledećim izrazima:

$$\begin{aligned}\underline{I}_\alpha &= \frac{\underline{U}_{k\alpha}}{\underline{Z}_\alpha} \\ \underline{I}_\beta &= \frac{\underline{U}_{k\alpha}}{\underline{Z}_\alpha} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \\ \underline{I}_o &= 0\end{aligned}\tag{5.46}$$

Primena principa superpozicije

U slučaju kvara raspodela napona i struja u ustaljenom prostoperiodičnom režimu kvara na osnovu slike 5.6, slučaj (B), se izračunava tako što se struje kvara injektiraju na mestu kvara, na osnovu sledećeg kompleksnog matičnog sistema jednačina.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{iB} \\ \underline{I}_{iB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_i + j\omega C_i & K \\ -K^T & R_i + j\omega L_i \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{Ki} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ za } i = \alpha, \beta, 0\tag{5.47}$$

gde je: $\underline{I}_{Ki}$ - struja kvara za $i = \alpha, \beta, 0$ određena vrstom kvara.

U slučaju sistema bez kvara, prema 5.6 slika (A), raspodela kompleksnih napona i struja u ustaljenom prostoperiodičnom režimu se dobijaju na osnovu sledećeg matičnog sistema jednačina, koji je identičan sa 5.9, samo sa izmenjenim oznakama:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{iA} \\ \underline{I}_{iA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_i + j\omega C_i & K \\ -K^T & R_i + j\omega L_i \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{E} \end{bmatrix} \text{ za } i = \alpha, \beta, 0\tag{5.48}$$

Superpozicija kompleksnih napona i struja pri kvaru i kompleksnih napona i struja bez kvara prikazana je sledećim izrazom:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_i \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{iB} \\ \underline{I}_{iB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_{iA} \\ \underline{I}_{iA} \end{bmatrix} \text{ za } i = \alpha, \beta, 0\tag{5.49}$$

5.3.5 Početni uslovi

Prelazni proces u mešovitoj mreži se rešava numeričkim postupkom rešavanja promenljivih stanja u mreži sa koncentrisanim parametrima i metodom putujućih talasa u mreži sa

raspoređenim parametrima. Početni uslovi za proračun prelaznog procesa se odvojeno određuju za mrežu sa koncentrisanim i za mrežu sa raspoređenim parametrima.

Početni uslovi u mreži sa koncentrisanim parametrima

Početni uslovi u mreži sa koncentrisanim parametrima se izražavaju u komponentnim sistemima (α , β , 0 ili simetrične komponente). U opštem slučaju obeležimo kompleksne promenljive na kapacitetima i induktivitetima mreže u komponentnim sistemima kao $\underline{X}_{jk}$, gde je j redni broj promenljive, a $k = \alpha, \beta, o$ u slučaju primenjene te transformacije. Pri tome može da bude $\underline{X}_{jk} = \underline{U}_{jk}$ ili $\underline{X}_{jk} = \underline{I}_{jk}$, odnosno $\underline{U}$ i $\underline{I}$ su oznake fazora napona čvorova ili fazora struja grana u komponentnim sistemima k .

Fazor j -te promenljive stanja $\underline{X}_{jk}$ u k -tom komponentnom sistemu se može predstaviti preko realnog i imaginarnog dela, odnosno:

$$\begin{aligned} X_{R_{jk}} &= \operatorname{Re}(\underline{X}_{jk}) = |X_{jk}| \cdot \cos(\Theta_{jk}) \\ X_{I_{jk}} &= \operatorname{Im}(\underline{X}_{jk}) = |X_{jk}| \cdot \sin(\Theta_{jk}) \end{aligned}$$

Amplituda j -te promenljive stanja u k -tom komponentnom sistemu se izračunava pomoću Pitagorine teoreme:

$$|X_{jk}| = \sqrt{X_{R_{jk}}^2 + X_{I_{jk}}^2} \quad (5.50)$$

U daljem tekstu, radi jednostavnosti, amplituda promenljive stanja biće obeležavana kao X_{jk} .

Fazni stav promenljive stanja Θ_{jk} određuje se iz izraza:

$$\Theta_{jk} = \arctan \frac{X_{I_{jk}}}{X_{R_{jk}}} \quad (5.51)$$

Početni uslovi na promenljivim stanja u α komponentnom sistemu dobijaju se iz sledećih izraza:

$$\begin{bmatrix} u_{o\alpha} \\ i_{o\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{o1\alpha} \\ u_{o2\alpha} \\ \dots \\ u_{on\alpha} \\ i_{o(n+1)\alpha} \\ i_{o(n+2)\alpha} \\ \dots \\ u_{o(n+m)\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{1\alpha} \cdot \cos(\Theta_{1\alpha}) \\ U_{2\alpha} \cdot \cos(\Theta_{2\alpha}) \\ \dots \\ U_{n\alpha} \cdot \cos(\Theta_{n\alpha}) \\ I_{o(n+1)\alpha} \cdot \sin(\Theta_{(n+1)\alpha}) \\ I_{o(n+2)\alpha} \cdot \sin(\Theta_{(n+2)\alpha}) \\ \dots \\ I_{o(n+m)\alpha} \cdot \sin(\Theta_{(n+m)\alpha}) \end{bmatrix} \quad (5.52)$$

Na potpuno isti način se mogu odrediti početni uslovi na promenljivim stanja u β i nultom komponentnom sistemu. Početni uslovi primenom transformacije u simetrične komponente se mogu vršiti identičnim postupkom.

Fazni početni uslovi se dobijaju transformacijom iz komponentnih u fazne veličine za svaki napon čvora, odnosno struju grane, transformacijama opisanim u sekciji 4.2.2, primenom izraza 4.22, odnosno za svaku kapacitivnu granu $i = 1, 2, \dots, n_C$ su određeni početni uslovi u faznim koordinatama:

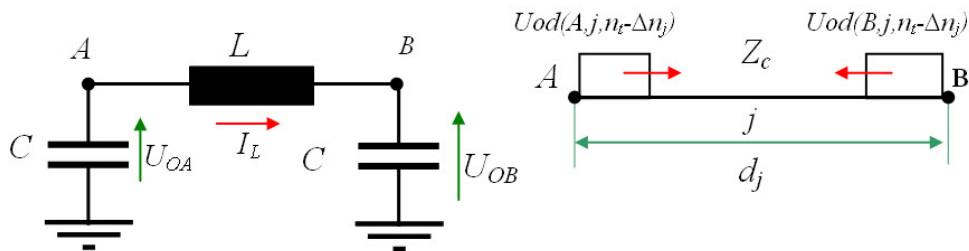
$$\begin{bmatrix} u_{oAi} \\ u_{oBi} \\ u_{oCi} \end{bmatrix} = [Q] \cdot \begin{bmatrix} u_{o\alpha i} \\ u_{o\beta i} \\ u_{oi} \end{bmatrix}$$

Za svaku induktivnu granu su određeni početni uslovi u faznim koordinatama za $j = n_C + 1, n_C + 2, \dots, n_C + n_L$:

$$\begin{bmatrix} i_{oAj} \\ i_{oBj} \\ i_{oCj} \end{bmatrix} = [Q] \cdot \begin{bmatrix} i_{o\alpha j} \\ i_{o\beta j} \\ i_{ooj} \end{bmatrix}$$

Početni uslovi u mreži sa raspoređenim parametrima

U slučaju mreže sa raspoređenim parametrima, odbijene komponente napona se određuju na osnovu napona na kondenzatorima u čvorovima na krajevima II modela deonice voda. Svi naponi se razmatraju u komponentnim sistemima. Dobijanje odbijenih komponenti napona koje predstavljaju početne uslove ilustrovano je na slici 5.12.



Slika 5.12: Određivanje početnih uslova na vodu

Odbijene komponente napona na slici 5.12 predstavljeni su kao trodimenzionalne matrice sa članovima koji odgovaraju čvorovima A i B i granom j , za vremenski trenutak definisan korakom $n_t - \Delta n_j$. Prelaskom na prebrojane indekse član koji odgovara čvoru

A i granu j pretvara se u član koji odgovara prebrojanom indeksu i_p , član koji odgovara čvoru A i granu j pretvara se u član koji odgovara prebrojanom indeksu i_q .

Odbijene komponente napona iz čvorova A i B moraju da se računaju za n_j vremenskih koraka koliko je potrebno odbijenoj komponenti da stigne do drugog kraja voda j .

Realni i imaginarni delovi kompleksnih napona u čvorovima A i B su:

$$U_R(A) = \operatorname{Re} \underline{U(A)} \quad (5.53)$$

$$U_I(A) = \operatorname{Im} \underline{U(A)}$$

$$U_R(B) = \operatorname{Re} \underline{U(B)} \quad (5.54)$$

$$U_I(B) = \operatorname{Im} \underline{U(B)}$$

Argument kompleksnog napona $|U(A)|$ je $\Theta(A)$, odnosno napona $|U(B)|$ je $\Theta(B)$.

$$\Theta(A) = \arctan\left(\frac{U_I(A)}{U_R(A)}\right) \quad (5.55)$$

$$\Theta(B) = \arctan\left(\frac{U_I(B)}{U_R(B)}\right)$$

Trenutne vrednosti odbijenih komponenti napona koje kreću iz čvora A u početnom trenutku, predstavljene kao element vektora sa prebrojanim indeksom i_p se mogu izračunati iz izraza:

$$u_{od}(i_p, n_t - \Delta n_j) = 0.5 \cdot |U_{i_p}| \cdot \cos[\omega(n_t - \Delta n_j) \cdot h - \Theta_{i_p}] \quad (5.56)$$

gde su:

$|U_{i_p}|$ - apsolutna vrednost fazora napona u čvoru A spojenog sa vodom j pretstavljenog preko indeksa prebrajanja i_p .

ω -industrijska kružna učestanost koja za 50 Hz iznosi 314 rad/s.

n_t -redni broj tekućeg koraka koji ima vrednost 0, 1,..., Δn_j . Odbijene kompone se moraju računati u svih Δn_j koraka, koliko je potrebno da napon iz tačke A stigne u tačku B po vodu j . Sve ove odbijene komponente napona predstavljaju početne uslove, jer one počinju da stižu u čvor B na drugom kraju voda posle Δn_j koraka.

h - elementarni vremenski korak proračuna.

5.3.6 Usaglašavanja početnih uslova u mreži sa koncentrisanim i raspoređenim parametrima

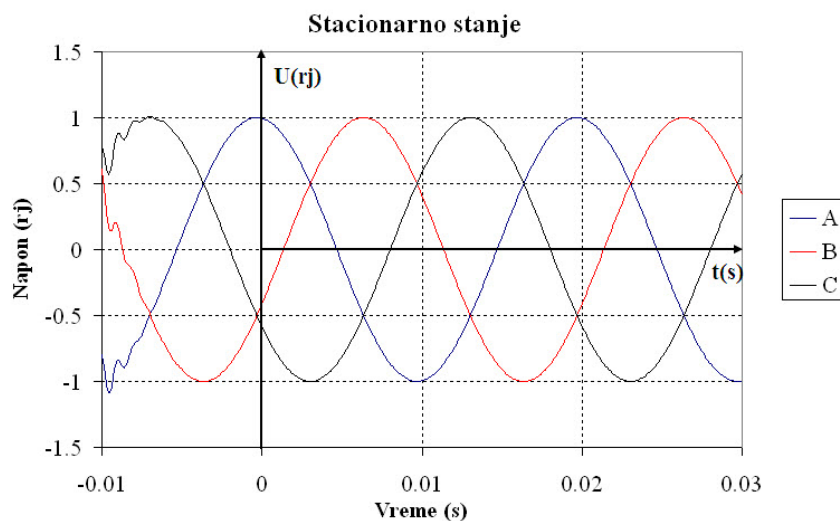
Prilikom početka rešavanja jednačina stanja u mreži sa koncentrisanim parametrima i putujućih talasa u ustaljenom stanju u mreži modelovanoj raspoređenim parametrima,

dolazi do pojave slabo izraženog prelaznog režima zbog toga što početni uslovi nisu u potpunosti usaglašeni.

- Vodovi se pri pripremi početnih uslova modeluju koncentrisanim parametrima u obliku II šeme. Kod dugačkih vodova neusaglašenost između procesa na vodu u obluku II šeme i na realnom vodu sa raspoređenim parametrima je veća.
- Na vodovima se pri rešavanju prelaznog režima uzima u obzir frekvencijski zavisno prigušenje i izobličenje talasa, koje se ne može modelovati pri pripremi početnih uslova.

Problem neusaglašenosti početnih uslova se najjednostavnije može rešiti na taj način što se proračun započinje u ustaljenom stanju i obavlja se sve dok se neželjeni prelazni proces potpuno ne priguši. Od tog trenutka se može smatrati da su parametri režima i u mreži sa koncentrisanim i u mreži sa raspoređenim parametrima usaglašeni. Ovi parametri režima će se smatrati početnim uslovima. Nadalje se može posmatrati stacionaran proces. Posle neke promene u sistemu se može analizirati prelazni režim koji je posledica isključivo promena u sistemu.

Na slici 5.13 prikazan je "pred-proračun" prelaznog procesa (deo proračuna koji se ne prikazuje korisniku) od trenutka -0.01 s do 0 s. Od trenutka 0 s do 0.03 s rezultati proračuna se zapisuju u fajl i nakon završetka proračuna prikazuju korisniku. Sve perturbacije u mreži se modeluju od trenutka $t > 0$ s.



Slika 5.13: Pred-proračun u cilju prigušenja prelaznog stanja usled neusaglašenosti početnih uslova

5.3.7 Određivanje vremenskog koraka proračuna

Vremenski korak proračuna je važan elemenat u priremi proračuna prelaznih režima. Kod različitih programa koriste se različiti načini određivanja vremenskog koraka. Vremenski korak može biti nepromenljiv u toku celog proračuna ili promenljiv.

Postoje 2 osnovna kriterijuma za određivanje nepromenljivog koraka proračuna.

- korak proračuna u mreži sa raspoređenim parametrima,
- korak proračuna u mreži sa koncentrisanim parametrima.

Kada se radi o mešovitoj mreži, usvaja se manji od predhodno odabrana 2 koraka.

Korak u mreži sa raspoređenim parametrima

Kod mreže sa raspoređenim parametrima, korak proračuna mora da bude jednak ili manji od vremena prostiranja po najkraćem vodu. Ukoliko imamo N_V vodova, korak proračuna je:

$$\Delta t = \min \left\{ \frac{d_1}{v}, \frac{d_2}{v}, \dots, \frac{d_{N_V}}{v} \right\} \quad (5.57)$$

gde je:

d_i - dužina i -tog voda u (m),

v - brzina prostiranja po vodu i u (m/s). Za nadzemni vod je to $v = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Sa ovako definisanim jedinicama vremenski korak se izražava u s.

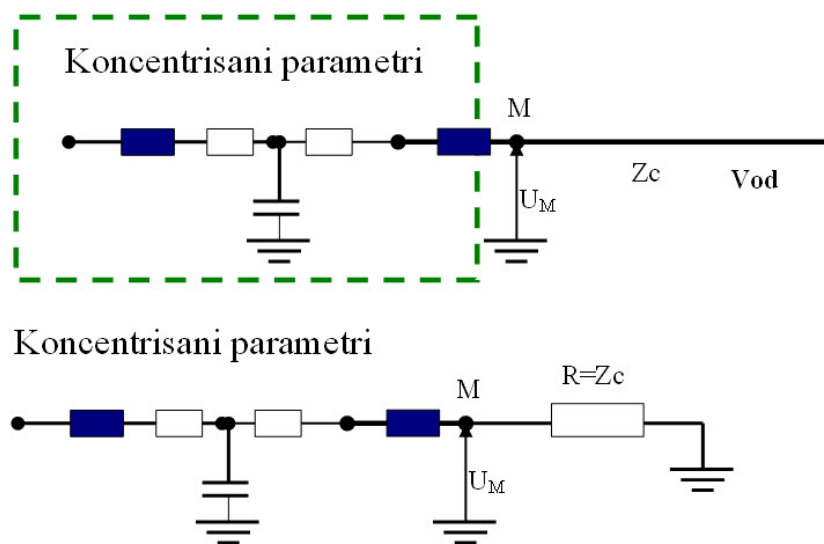
Pri proračunu atmosferskih prenapona, po pravilu najkraći korak definiše se na osnovu najkraćeg dela stuba (konzole) ili spusta od faznog provodnika do odvodnika prenapona. Kada se usvoji korak proračuna Δt , tada se dužine deonice zaokružuju na najbliži ceo umnožak najkraće deonice $\Delta d = v \cdot \Delta t$.

Korak u mreži sa koncentrisanim parametrima

Izbor koraka proračuna u mreži sa koncentrisanim parametrima vrši se na osnovu najviše sopstvene učestanosti mreže na oscilatornim delovima kola, odnosno na najkraćem

vremenu odziva delova kola sa aperioidičnim odzivom. Korak proračuna se može na ovaj način određivati samo u slučajevima konstantnih parametara mreže, dok kod nelinearnih mreža se korak ne može unapred odrediti.

U tu svrhu se mogu koristiti različite metode. Jedna od metoda je bazirana na određivanju sopstvenih učestanosti kompletne mreže za koncentrisanim parametrima uvažavajući uticaj mreže sa raspoređenim parametrima preko ekvivalentnih otpornika. Na slici 5.14 je prikazana je modifikovana mreža sa koncentrisanim parametrima koja u zajedničkim čvorovima ima priključene otpornike prema zemlji, koji imaju otpornost koja je identična vrednosti karakteristične impedanase voda.



Slika 5.14: Formiranje ekvivalentnog kola za određivanje sopstvene učestanosti

Automatizovan izbor koraka na osnovu karakterističnog polinoma

Na osnovu jednačina stanja u matričnom obliku date izrazom 2.32, odnosno 2.33 na strani 28 napravljena je matrica u operatorskom domenu koja reprezentuje mrežu, uvažavajući i ekvivalentne otpornike koji zamenjuju mrežu sa raspoređenim parametrima u zajedničkim čvorovima.

$$\begin{bmatrix} p \cdot u_1 \\ p \cdot i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left\{ - \begin{bmatrix} G & K \\ -K^t & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_c \\ E_L \end{bmatrix} \right\} \quad (5.58)$$

U skraćenoj formi predhodni izraz ima oblik:

$$\begin{bmatrix} p \cdot u_1 \\ p \cdot i_2 \end{bmatrix} = [A] \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_c \\ E_L \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

U izrazu 5.58 i 5.59 veličina p predstavlja Laplasov operator.

Karakteristične vrednosti matrice $[A]$ dobijaju se rešavanjem determinante:

$$\det(\lambda \cdot \mathbf{I} - A) = 0 \quad (5.60)$$

gde je $\mathbf{I}$ kvadratna jedinična matrica. Kada se determinanta koja se dobija na osnovu matrice elemenata sistema izjednači sa nulom, dobija se karakteristična jednačina. Rešenja karakteristične jednačine po λ predstavljaju karakteristične vrednosti matrice. Ukupan broj karakterističnih vrednosti jednak je redu matricem, sem ako nema višestrukih rešenja. Svaka karakteristična vrednost matrice odgovara određenoj slobodnoj učestanosti u slučaju kompleksnih rešenja ili koeficijentu prigušenja u slučaju realnih rešenja.

Korak proračuna se određuje na osnovu najveće slobodne učestanosti, ili na osnovu najkraće vremenke konstante. Smatra se da se sa zadovoljavajućom tačnošću može proračun vršiti sa korakom koji iznosi:

$$\Delta t = \frac{2\pi}{10 \cdot \omega_{Max}} \quad (5.61)$$

gde je ω_{Max} maksimalna slobodna kružna učestanost izračunata na osnovu rešavanje karakterističnog polinoma.

U slučaju aperiodičnog rešenja, može se usvojiti da je korak proračuna:

$$\Delta t = \frac{T}{10} \quad (5.62)$$

gde je T dobijena vremenska konstanta na osnovu rešavanje karakterističnog polinoma.

U slučaju mešovityh mreža se može dogoditi da je korak proračuna mnogo manji nego što je to potrebno u mreži sa raspoređenim parametrima. Ukoliko mreža sa raspoređenim parametrima ima jako dugačke vodove, na kojima je potreban veliki broj komponenti koje treba memorisati, tada se mogu raditi proračuni u mreži sa raspoređenim parametrima sa većim korakom, na primer $h_r = n_r \times h_k$, gde je:

h_r -korak proračuna u mreži sa raspoređenim parametrima.

h_k -korak proračuna u mreži sa koncentrisanim parametrima.

n_r -multipl koraka proračuna u mreži sa raspoređenim parametrima u odnosu na korak u mreži sa koncentrisanim parametrima.

U tom slučaju bi se uticaj između mreža uvažavao preko ekvivalentnih generatora posle svakih n_r koraka. Ovakav slučaj je redak, odnosno izborom adekvatnog ekvivalentnog kola se može izbeći. U slučaju prelaznog procesa jako visoke učestanosti dugačak vod se može zameniti ekvivalentnim otpornikom koji simulira beskonačno dugačak vod. U realnim sistemima visokofrekvencijske prelazne pojave generisane u mreži sa koncentrisanim parametrima se prigušuju prilikom prostiranja po vodovima usled frekvencijski zavisnih parametara, tako da nemaju značaj na drugom kraju dugačkih vodova.

Približna metoda određivanja koraka proračuna u mreži sa koncentrisanim parametrima

Prilikom pripreme parametara koncentrisane mreže se najčešće raspolaže parametrima direktnog, odnosno α sistema ili 0-tog sistema, koji se kasnije transformišu u fazne i međufazne parametre. Po približnoj metodi se određivanje najviših sopstvenih učestanosti radi tako što se prvo definišu parametri grana koji utiču na sopstvene učestanosti mreže. To se radi na sledeći način:

- Iz liste svih induktivnih grana odredi se grana sa minimalnom α komponentom induktiviteta $L_{\alpha MIN}$.
- Iz liste svih induktivnih grana odredi se grana sa minimalnom 0-tom komponentom induktiviteta $L_{0 MIN}$.
- Iz liste svih kapacitivnih grana odredi se grana sa minimalnom α komponentom kapaciteta $C_{\alpha MIN}$.
- Iz liste svih kapacitivnih grana odredi se grana sa minimalnom 0-tom komponentom kapaciteta $C_{0 MIN}$.
- Iz liste svih otporničkih grana odredi se grana sa minimalnom α komponentom otpornosti $R_{\alpha MIN}$.
- Iz liste svih otporničkih grana odredi se grana sa minimalnom 0-tom komponentom otpornosti $R_{0 MIN}$.

Na osnovu minimalnih vrednosti parametra α sistema određuju se prvo maksimalne sopstvene učestanosti za α sistem.

$$\omega_{\alpha MAX} = \frac{1}{\sqrt{C_{\alpha MIN} L_{\alpha MIN}}} \quad (5.63)$$

Na osnovu minimalnih vrednosti parametra nultog sistema određuju se maksimalne sopstvene učestanosti za nulti sistem.

$$\omega_{0MAX} = \frac{1}{\sqrt{C_{0MIN} L_{0MIN}}} \quad (5.64)$$

Zatim se bira veća slobodna učestanost.

$$\omega_{MAX} = \max \{ \omega_{\alpha MAX}, \omega_{0 MAX} \} \quad (5.65)$$

Na osnovu minimalnih vrednosti parametra α sistema određuju se minimalne vremenske konstante za α sistem za grane u kojima dominira otpornost. To su po pravilu u elektroenergetskim sistemima induktivne grane koje su u zajedničkim čvorovima spojene sa vodovima, koji se zamenjuju otpornicima koji imaju vrednost karakteristične impedanse vodova, mada mogu da budu i otpornički potrošači.

$$T_{\alpha MIN} = L_{\alpha MIN} \cdot R_{\alpha MIN} \quad (5.66)$$

Na osnovu minimalnih vrednosti parametra o -tog sistema određuju se minimalne vremenske konstante za 0 -ti sistem.

$$T_{0min} = L_{0MIN} \cdot R_{0MIN} \quad (5.67)$$

Na kraju se bira manja vremenska konstanta.

$$T_{MIN} = \min \{ T_{\alpha MIN}, T_{0MIN} \} \quad (5.68)$$

Vremenski korak proračuna se bira kao manja vrednost koraka na osnovu vremenske konstante ili slobodne učestanosti iz izraza:

$$\Delta T = \min \left\{ \frac{T_{MIN}}{N}, \frac{2\pi}{N \times \omega_{MAX}} \right\} \quad (5.69)$$

gde je N - ceo broj koji se može sa zadovoljavajućom tačnošću usvojiti da je 10, koji predstavlja broj koraka potrebnih za modelovanje jedne periode maksimalne učestanosti.

Adaptivni korak proračuna

U slučaju mreže sa koncentrisanim parametrima koja sadrži nelinearne elemente, kao što je na primer nelinearna karakteristika magnećenja transformatora, može se dogoditi da usled smanjenja induktiviteta usled ulaska u zasićenje, dođe do pojave oscilacija viših sopstvenih učestanosti, što u slučaju neadekvatnog koraka dovodi do velike numeričke greške ili čak do numeričke nestabilnosti.

Prva faza

Izbor adaptivnog koraka se sprovodi na taj način što se izvrši proračun prelaznog procesa u dva uzastopna koraku $k \cdot \Delta t_1$, i $(k+1) \cdot \Delta t_1$, gde je k redni broj koraka, a Δt_1 odabrani elementarni korak proračuna.

Razlika vektora promenljivih stanja u dva susedna koraka prikazana je u obliku razlike 2 vektora:

$$\begin{bmatrix} x_1[(k+1) \cdot \Delta t_1] \\ x_2[(k+1) \cdot \Delta t_1] \\ \dots \\ x_n[(k+1) \cdot \Delta t_1] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1(k \cdot \Delta t_1) \\ x_2(k \cdot \Delta t_1) \\ \dots \\ x_n(k \cdot \Delta t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1(\Delta t_1) \\ \Delta x_2(\Delta t_1) \\ \dots \\ \Delta x_n(\Delta t_1) \end{bmatrix} \quad (5.70)$$

Maksimalna greška proračuna u ovom slučaju za vremensku razliku Δt_1 je:

$$\Delta x_{Max1} = \max \{ \Delta x_1(\Delta t_1), \Delta x_2(\Delta t_1), \dots, \Delta x_n(\Delta t_1) \} \quad (5.71)$$

Druga faza

U dugoj fazi se korak proračuna deli sa dva, tako da je novi korak $\Delta t_2 = \Delta t_1/2$. Proračun se vrši u tri koraka i to u koracima $k\Delta t_1$, $k\Delta t_1 + \Delta t_2$ i $k\Delta t_1 + 2\Delta t_2$.

Provera tačnosti se vrši oduzimanjem poslednjeg rezultata u trenutku $k\Delta t_1 + 2\Delta t_2$ i prvog rezultata, odnosno:

$$\begin{bmatrix} x_1(k\Delta t_1 + 2\Delta t_2) \\ x_2(k\Delta t_1 + 2\Delta t_2) \\ \dots \\ x_n(k\Delta t_1 + 2\Delta t_2) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1(k\Delta t_1) \\ x_2(k\Delta t_1) \\ \dots \\ x_n(k \cdot \Delta t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1(2\Delta t_2) \\ \Delta x_2(2\Delta t_2) \\ \dots \\ \Delta x_n(2\Delta t_2) \end{bmatrix} \quad (5.72)$$

Maksimalna greška proračuna u ovom slučaju za vremensku razliku Δt_1 je:

$$\Delta x_{Max2} = \max \{ \Delta x_1(2\Delta t_2), \Delta x_2(2\Delta t_2), \dots, \Delta x_n(2\Delta t_2) \} \quad (5.73)$$

Ukoliko je uslov da je absolutna greška $|\Delta x_{Max2} - \Delta x_{Max1}| < \varepsilon$ ispunjen, gde je ε dozvoljena greška, usvajaju se rezultati iz prve faze proračuna. U suprotnom se usvaja novi korak proračuna $\Delta t_3 = \Delta t_2/2$ i ponavlja se druga faza i proverava kriterijum 5.73. Ukoliko je greška manja od dozvoljene, usvaja se korak proračuna Δt_2 , a u suprotnom se nastavlja deljenje koraka sa 2. Postupak se može ponavljati dalje za korake $\Delta t_4 = \Delta t_3/2$, dok se ne zadovolji kriterijum 5.73. Umesto sa apsolutnim greškama, može se koristiti relativna greška, kada se razlika promenljivih stanja iz različitih koraka deli sa promenljivom stanja.

Ukoliko se u svakom koraku proračuna vrši procena greške i podešavanje koraka, to može značajno da produži trajanje proračuna. Stoga se u linearnim mrežama može proveriti korak na početku proračuna i držati konstantnim dok ne dođe do promene konfiguracije mreže. Nakon promene konfiguracije se ponovo proverava korak.

Ukoliko se poznaju minimalne vrednosti nelinearnih elemenata, tada se može odabrati korak proračuna prema tim vrednostima elementa umesto da se stalno proverava korak proračuna.