

3. TOKOVNE OBREMENITVE

3.1 Tokovne obremenitve v normalnih obratovalnih stanjih

Pri dimenzioniranju in izbiri elektroenergetskih elementov in naprav je potrebno z upoštevanjem predpisov upoštevati nazivne tokovne obremenitve. Termične obremenitve, ki pri tem nastopajo nesmejo biti prekoračene. Predpisi opredeljujejo tudi dopustne padce napetosti in drugo. To obširno tematiko v nadaljevanju ne bomo obravnavali.

3.2 Tokovne obremenitve v nenormalnih obratovalnih stanjih

Pri dimenzioniranju in izbiri električnih obratovalnih elementov in naprav je potrebno z upoštevanjem predpisov poleg nazivne tokovne obremenitve upoštevati tudi obremenitve, ki se pojavljajo v obliki kratkih stikov. Kratkostični tokovi se pojavljajo kot mnogokratnik nazivnega toka. Pri tem se pojavijo velike dinamične in termične obremenitve. Kratkostični tokovi, ki se zaključujejo preko zemlje lahko povzročajo nedopustne napetosti dotika in druge vplive. Če velikost kratkostičnih tokov pri projektiranju ni upoštevana, lahko privede do uničenja naprav in do nevarnih posledic za ljudi. Pomembni so tudi najmanjši kratkostični tokovi, na osnovi katerih se izbirajo in dimenzionirajo naprave za zaščito električnega omrežja.

3.2.1 Vrste kratkih stikov

Kratki stiki povzročajo v električnih omrežjih spremembo stanja električnih veličin. Prehod v novo stanje je povezan z elektromagnetnimi in elektromehanskimi prehodnimi pojavi od katerih je odvisen časovni potek in velikost kratkostičnih tokov.

Prehodni pojavi bodo poleg vrste kratkega stika odvisni od trenutka nastopa kratkega stika, prisotnega kratkostičnega tokovnega izvora, od stanja obremenitve pred nastopom kratkega stika, trajanjem kratkega stika, karakterističnih vrednosti in od vedenja prisotnih obratovalnih elementov.

Čas nastanka kratkega stika je pomemben za dimenzioniranje obratovalnih elementov ter v odnosu na potek napetosti odločilno vpliva na največjo amplitudno vrednost kratkostičnega toka.

Kratkostične tokovne izvore predstavljajo zlasti sinhronski stroji različnih izvedb (n.pr. turbogenerator, stroji z izraženimi poli). Prav tako predstavljajo tokovne izvore asinhronski generatorji, pa tudi sinhronski in asinhronski motorji ter usmerniške in razsmerniške naprave. (Na potek prehodnega pojava bistveno vplivajo specifične lastnosti omenjenih strojev - pri dalj časa trajajočem kratkem stiku velja to tudi za regulacijske naprave, kot so napetostni regulator in regulator moč - frekvenca.)

Velikokrat nastopa kot kratkostični tokovni izvor kratkostična moč tujega vira n.pr. pri regionalni oskrbi z električno energijo ali pri industrijskih obratih.

TOKOVNE OBREMENTIVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

Obremenitveno stanje električnega omrežja pred nastopom kratkega stika (velika ali majhna obremenitev) ne določa samo število in moč paralelno delujočih proizvodnih enot in porabnikov, ampak tudi velikost napetosti kratkostičnih tokovnih izvorov.

Lega kratkostičnega mesta v omrežju odloča o tem, ali sinhronski stroj bolj ali manj vpliva na potek kratkostičnega toka - v smislu VDE predpisov govorimo o kratkem stiku blizu generatorja oziroma daleč od generatorja. Lega kratkostičnega mesta je odločujoča tudi za obseg motenj v omrežju (n.pr. napaka na zbiralkah).

Trajanje kratkostičnega toka je pretežno odvisno od stikalnih elementov in zaščitnih naprav, ki so sestavni del omrežja.

Oblika omrežja (n.pr. žarkasto ali zazankano omrežje) nudi kratkostičnemu toku in njegovim delnim kratkostičnim tokovom določene tokovne poti. Impedanca omrežja je odvisna od vrste prenosnih elementov (n.pr. nadzemni vod, kabel, transformator i.dr.) in od obsega, ki ga omrežje zajema.

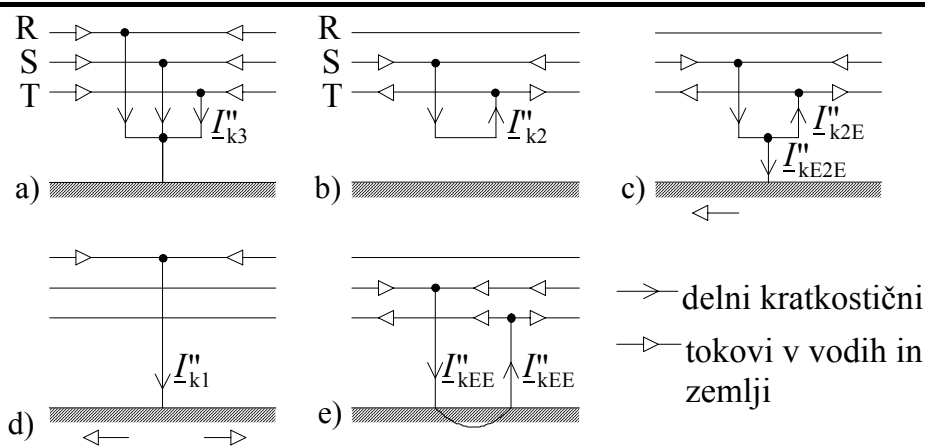
V bistvu se v trifaznih omrežjih pojavljajo vrste kratkih stikov, ki so nakazane na sliki 1.1.

Pri trifaznem kratkem stiku so na kratkostičnem mestu vse tri napetosti enake nič. Kratkostični tokovi, ki so med seboj premaknjeni za 120 stopinj, simetrično obremenjujejo vse tri faze in to neglede ali je kratkostično mesto povezano z zemljo ali ne. Izračun kratkostičnih tokov je zaradi tega tako kot pri simetričnih obremenitvenih razmerah izveden samo za en fazni vodnik.

Pri ostalih štirih vrstah kratkih stikov je govora o nesimetričnih kratkih stikih. Če nastopa dodatni dotik z zemljo je postopek izračuna bistveno zahtevnejši. V teh primerih niso vse napetosti na kratkostičnem mestu enake nič. Zaradi nesimetričnih obratovalnih pogojev obstaja medsebojna povezava med zunanjimi vodniki kakor tudi med zunanjimi vodniki in eventualno obstoječim vodnikom, ki nadomešča zemljo.

Pri dvopolnem kratkem stiku brez dotika z zemljo se pojavlja začetni izmenični kratkostični tok, ki je manjši kot pri tripolnem kratkem stiku. Če nastopa kratkostično mesto v bližini sinhronskega ali asinhronskega stroja odgovarjajoče moči, je lahko kratkostični tok v njegovem nadaljnjem poteku večji, kot pri tripolnem kratkem stiku.

Podobne razmere nastopajo pri dvopolnem kratkem stiku z dotikom z zemljo.



- a) tripolni kratki stik
- b) dvopolni kratki stik brez dotika z zemljo
- c) dvopolni kratki stik z dotikom z zemljo
- d) enopolni zemeljski stik
- e) dvojni zemeljski stik

Opomba:

delni kratkostični tokovi lahko tečejo tudi v vodnikih, ki niso v okvari. Dane smeri tokov so poljubno izbrane.

Slika 1.1 Označba vrste kratkega stika in kratkostičnih tokov

Enopolni zemeljski stik se pojavlja pogosteje, kot druge vrste kratkih stikov. V omrežjih z nizko ohmsko ozemljitvijo v zvezdišču lahko tokovi zemeljskega stika presegajo največje vrednosti tripolnih kratkostičnih tokov.

Dvojni zemeljski stik se pojavlja v omrežjih z neozemljenim zvezdiščem ali z zemeljskostično kompenzacijo. Dvojni zemeljskostični tok ne more biti večji od toka pri dvopolnem kratkem stiku z ali brez dotika z zemljo.

Kratkostični tokovi pri enopolnem kratkem stiku in pri dvojnem zemeljskem stiku morajo biti upoštevani pri ugotavljanju napetosti dotika, pri ugotavljanju vplivov in pri dimenzioniranju ozemljitvenih naprav.

3.2.2 Kratki stik na sponkah generatorja v praznem teku

Opomba: iz prevoda knjige R. Roeper-ja, Kratkostični tokovi v trifaznih omrežjih so povzeta določena poglavja. Zato poglavja ponekod ne sovpadajo z označevanjem enačb.

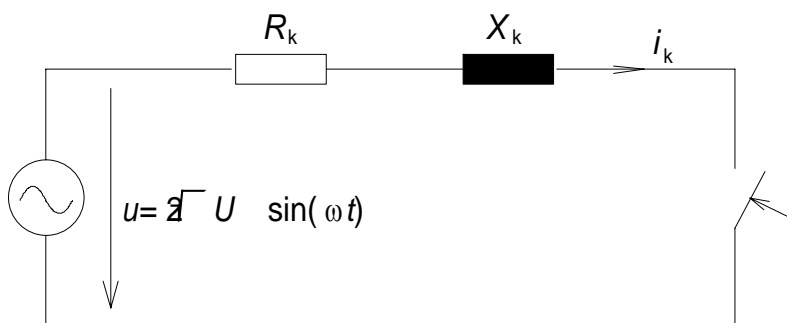
Enofazno omrežje

Slika 2.1 kaže nadomestno vezavo neobremenjenega izmeničnega tokokroga. Tokokrog sestavlja idealen napetostni izvor (notranja upornost je enaka nič) s sinusno napetostjo (temenska vrednost napetosti $\sqrt{2}U$ in krožna frekvenca $\omega = 2\pi f$ sta konstantni). Aktivni

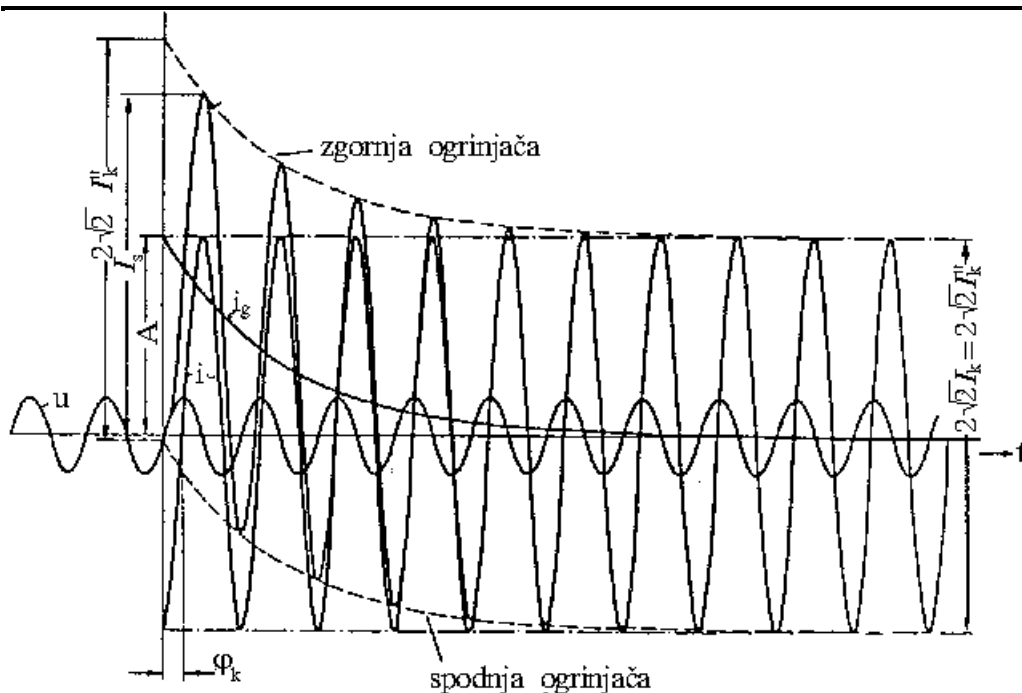
upor R_k in induktivna reaktanca $X_k = \omega L_k$ sta konstantna in linearna. S priklopom stikala v trenutku prehoda napetosti skozi nič ($t=0$) nastopi kratek stik.

Kratkostični tok i_k (slika 2.2) nastopi v času $t=0$ z vrednostjo $i_k = 0$ in narašča do najvišje vrednosti - udarni tok kratkega stika I_s ter se nato izniha na stacionarno vrednost kratkostičnega toka i_k . Ta tok ima konstantno temensko vrednost. Njegovo efektivno vrednost označujemo s trajnim kratkostičnim tokom I_k .

Asimetrija in temenska vrednost kratkostičnega toka je določena s trenutkom nastopa kratkega stika v odnosu na potek napetosti in kratkostične impedance omrežja $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$. Če ima impedanca \underline{Z}_k relativno veliko induktivno komponento, kar je običaj za visokonapetostna omrežja, takrat mora kratkostični izmenični tok v času $t=0$ skokovito narasti na trenutno vrednost kratkostičnega izmeničnega toka. Ker induktivnost preprečuje skokovito naraščanje toka, prične naraščanje kratkostičnega toka dejansko z vrednostjo nič.



Slika 2.1 Nadomestna shema izmeničnega tokokroga brez obremenitve



- I_k'' začetni izmenični kratkostični tok,
- I_s udarni tok kratkega stika,
- A začetna vrednost enosmerne komponente toka,
- i_g enosmerna komponenta toka,
- $i_~$ izmenični kratkostični tok
- φ_k kot kratkostične impedance omrežja
- I_k trajni tok kratkega stika

Slika 2.2 Potek napetosti u in kratkostičnega toka i_k

Zaradi tega se pojavi izenačevalni tok i_g katerega začetna vrednost A odgovarja trenutni negativni vrednosti kratkostičnega izmeničnega toka $i_~$. Izenačevalni tok je označen kot enosmerna komponenta toka in upada po eksponencialni funkciji z enosmerno časovno konstanto T_g od začetne vrednosti na vrednost nič.

Kratkostični izmenični tok je določen z napetostjo in impedanco omrežja. Efektivno vrednost toka v trenutku nastopa kratkega stika imenujemo začetni kratkostični izmenični tok I_k'' . Pri konstantnih vrednostih U in \underline{Z}_k je tok I_k'' v nasprotju z odnosom pri kratkem stiku blizu generatorja (poglavje 2.3), kjer je govora tudi o trajnem toku kratkega stika, enak toku I_k .

Povezovalna krivulja daje potek temenskih vrednosti kratkostičnega toka. Presečišče zgornje ogrinjače z ordinato daje vrednost $A + \sqrt{2}I_k''$. Enosmerna komponenta odgovarja srednji krivulji med zgornjo in spodnjo ogrinjačo.

Potek kratkostičnega toka se lahko poda z naslednjo enačbo:

$$i_k = i_~ + i_g \quad (2.1a) \text{ in } (2.1b)$$

$$= \frac{\sqrt{2} U}{Z_k} [\sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - e^{-t/T_g} \cdot \sin(\psi - \varphi_k)] \quad (2.1a)$$

$$= \sqrt{2} I_k'' [\sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - e^{-t/T_g} \cdot \sin(\psi - \varphi_k)] \quad (2.1b)$$

Oznake v enačbi imajo naslednji pomen:

U efektivna vrednost,

Z_k kratkostična impedanca omrežja $\left(= \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \right)$,

ω krožna frekvenca $(= 2\pi f)$

t čas

ψ vklopni kot napetosti u pri nastopu kratkega stika

φ_k kot kratkostične impedance omrežja $\left(= \arctg \frac{X_k}{R_k} \right)$

T_g enosmerna časovna konstanta $\left(= \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k} \right)$,

I_k'' začetni izmenični kratkostični tok $\left(= \frac{U}{Z_k} \right)$

Velikosti Z_k , φ_k in T_g so dane s parametri tokokroga R_k in X_k kratkostične impedance omrežja. Vklopni kot ψ je odvisen od trenutka nastopa kratkega stika t_k .

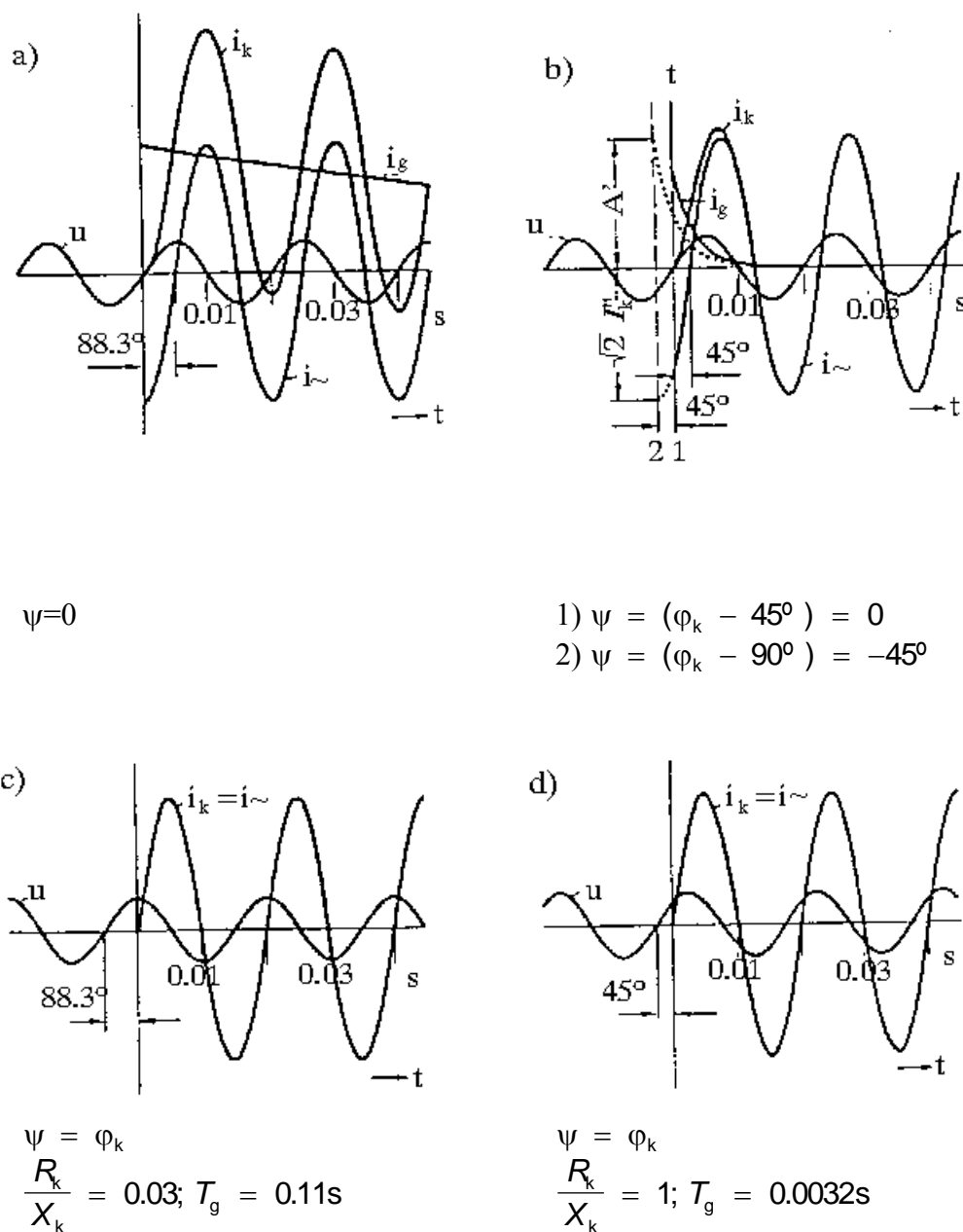
Iz enačbe za i_k je razvidno, da je pri enakih impedancah Z_k velikost temenske vrednosti kratkostičnega izmeničnega toka odvisna od impedančnega kota φ_k .

Največja začetna vrednost enosmerne komponente i_g nastopi pri vklopnem kotu

$$\psi = (\varphi_k - 90^\circ)$$

Višina prve tokovne konice I_s kratkostičnega toka i_k je odvisna od vklopnega kota ψ in impedančnega kota φ_k . Vedno je največja vrednost dosežena pri vklopnem kotu $\psi = 0$ (glej sliko 2.5). Pri $\psi = \varphi$ ne nastopi enosmerna komponenta; kratkostični tok i_k je identičen s kratkostičnim izmeničnim tokom i_- . Ta medsebojna odvisnost se pojasnjuje (slika 2.3a do 2.3d) s potekom kratkostičnega toka za dva različna razmerja parametrov tokokroga R_k/X_k pri nespremenjeni kratkostični impedanci Z_k . Za $R_k/X_k = 0.03$ (n.pr. pri dušilki, ki omejuje kratkostični tok) je impedančni kot $\varphi_k = 88.3^\circ$ (praktično $\approx 90^\circ$). Razmerje $R_k/X_k = 1$ ($\varphi_k = 45^\circ$) lahko nastopi v nizkonapetostnih kabelskih omrežjih.

Na sliki 2.3a ($\varphi_k \approx 90^\circ$) imata začetna vrednost enosmerne komponente, kot tudi prva temenska vrednost kratkostičnega toka pri $\psi = 0$ skoraj maksimalno vrednost. Višina in potek kratkostičnega toka je močno odvisna od počasnega upadanja enosmerne komponente.



slika 2.3

Potek napetosti u in kratkostičnega toka i_k pri različnih parametrih tokokroga in vklopnih kotov ψ .

Na sliki 2.3b ($\varphi_k = 45^\circ$) ima pri $\psi = 0$ prva temenska vrednost kratkostičnega toka ravno tako najvišjo vrednost, čeprav enosmerna komponenta ne natopa z največjo možno vrednostjo.

Če je vklopni kot $\psi = -45^\circ$ (črtkana krivulja) ima začetna vrednost enosmerne komponente !! ob nastopu kratkega stika največjo možno vrednost. Prva temenska vrednost kratkostičnega toka ne doseže tiste vrednosti kot pri $\psi = 0$, ker je enosmerna komponenta že enaka nič.

TOKOVNE OBREMENTIVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

Na sliki 2.3c in d ($\varphi_k \approx 90^\circ$ oziroma $\varphi_k = 45^\circ$) ne nastopi pri vklopnem kotu $\psi = \varphi_k$ enosmerna komponenta toka. Kratkostični tok je enak izmeničnemu kratkostičnemu toku.

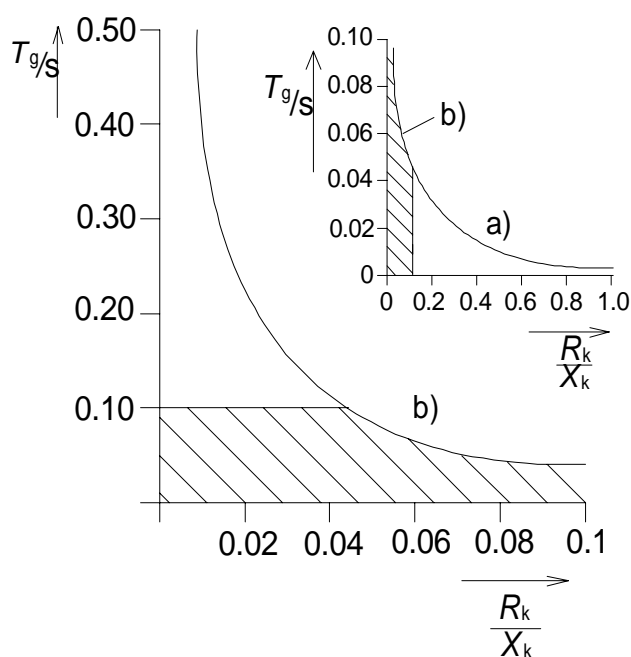
Odvisnost konstante T_g od razmerja R_k/X_k je prikazana na sliki 2.4a in b. Diagram b kaže, da pri razmerju $R_k/X_k < 0.1$ časovna konstanta T_g močno narašča.

Za kratkostične impedance omrežja lahko teoretično opazujemo dvoje mejnih primerov:

Če je $\underline{Z}_k = jX_k$ (induktivna reaktanca) nastopi po nastanku kratkega stika pri obratovalni frekvenci 50 Hz največja amplituda toka v času 0.01s. Pri tem je začetna vrednost enosmerne komponente toka enaka temenski vrednosti A izmenične komponente toka $\sqrt{2}I_k''$. Enosmerna komponenta ne upada, ker je enosmerna časovna konstanta enaka $T_g = \infty$.

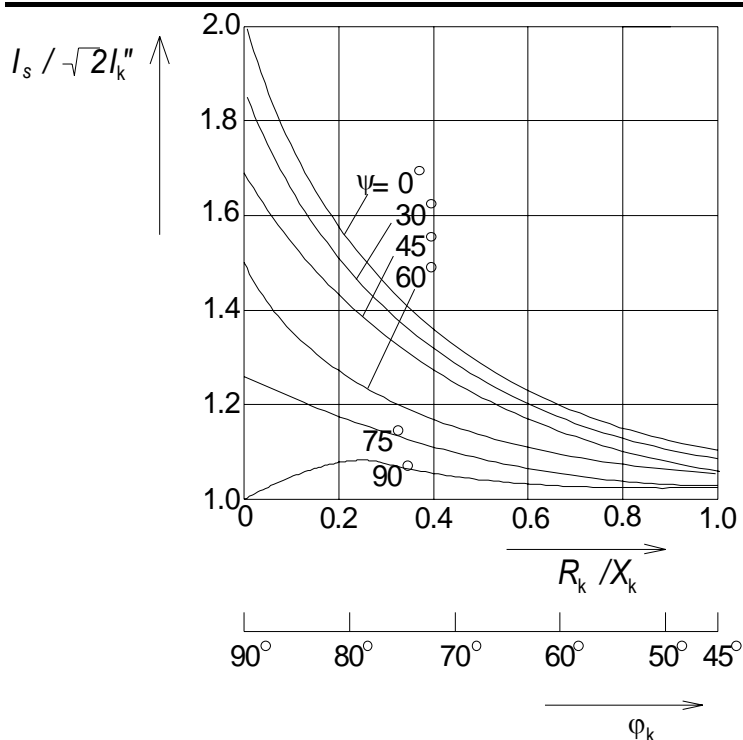
Če je $\underline{Z}_k = R_k$ (aktivni ohmski upor), ne nastopi enosmerna komponenta toka. Kratkostični tok i_k je enak kratkostičnemu izmeničnemu toku.

Na sliki 2.5 je prikazan odnos med $I_s/\sqrt{2}I_k''$ in R_k/X_k v odvisnosti od vklopnega kota !.



Slika 2.4

Časovna konstanta toka T_g odvisna od razmerja R_k/X_k



Slika 2.5

Odvisnost $I_s / \sqrt{2}I_k''$ (kvocient udarnega toka kratkega stika in temenske vrednosti začetnega kratkostičnega izmeničnega toka), kot funkcija razmerja R_k / X_k in vklopnega kota y .

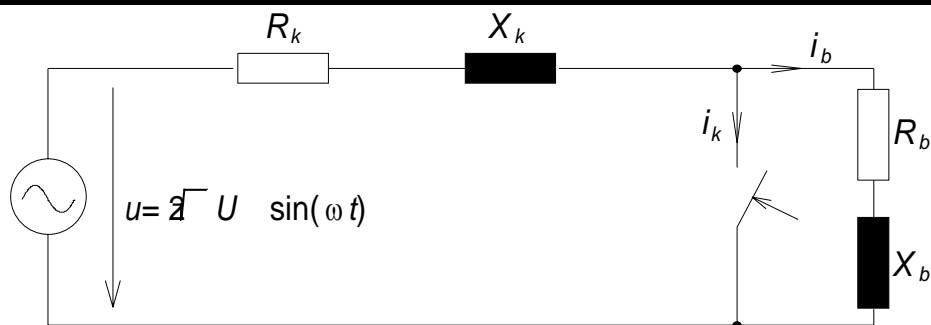
3.2.2 Kratki stik na sponkah obremenjenega generatorja

Slika 2.6 prikazuje nadomestno stikalno shemo za enofazno obremenjeni izmenični tokokrog. Obremenitev je nakazana s konstantno impedanco $\underline{Z}_b = R_b + jX_b$ ter s tokom i_b . Za nastanek kratkega stika velja pogoj, da je $i_k = i_b$.

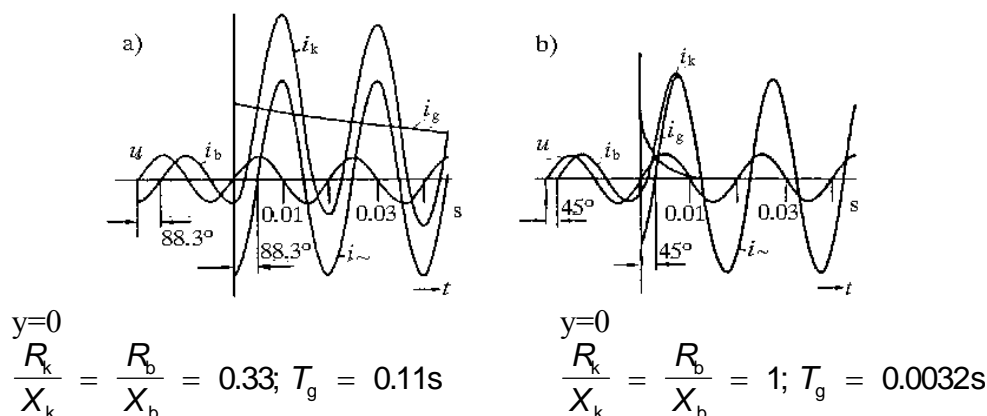
Na sliki 2.7 sta podana (s podatki s slike 2.3) dva primera z različnimi parametri tokokroga pri pogoju $R_k / X_k = R_b / X_b$:

Slika 2.7a velja za $R_k / X_k = R_b / X_b = 0.03$, torej za $\varphi_k = \varphi_b$. Obremenilni tok i_b poteka s fazno premaknitvijo 88.3 stopinj za obratovalno napetostjo.

Slika 2.7b odgovarja razmerju $R_k / X_k = R_b / X_b = 1$. Obremenilni tok zaostaja za napetostjo u za fazni kot 45° .



Slika 2.6
Nadomestna stikalna shema izmeničnega tokokroga z obremenitvijo.



Slika 2.7

Potek napetosti u in kratkostičnega toka i_k pri različnih parametrih tokokroga ob upoštevanju obremenitve.

V obeh primerih mora pričeti kratkostični tok i_k s trenutno vrednostjo obremenilnega toka i_b . Da bo ta pogoj izpolnjen, mora bit začetna vrednost enosmerne komponente enaka negativni diferenci trenutne vrednosti ($i_{\sim} - i_b$). V primeru b je vpliv enosmerne komponente na velikost prve temenske vrednosti kratkostičnega toka zmanjšan zato, ker zelo hitro upada s časom.

Primerjava med sliko 2.3 in 2.7 kaže, da so si kratkostični izmenični tokovi identični, medtem ko je začetna vrednost kratkostičnega toka zmanjšana zaradi obremenilnega toka.

V nasprotju s predstavljenimi tokovnimi vrednostmi na omenjenih slikah, nastopajo v praksi, v primerjavi z obremenilnimi tokovi, večji kratkostični tokovi. Razmerje R/X med kratkostično impedanco Z_k in obremenilno impedanco Z_b močno odstopa.

Časovni potek kratkostičnega toka z obremenitvijo, lahko opišemo s sledečo enačbo:

$$i_k = i_{\sim} + i_b + i_g$$

$$= \frac{\sqrt{2}U}{Z_k} \left\{ \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) + \left[\frac{Z_k}{Z} \sin(\psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi_k) \right] e^{-t/T_g} \right\} \quad (2.2a)$$

$$= \sqrt{2}I_k'' \left\{ \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) + \left[\frac{I_b}{I_k''} \sin(\psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi_k) \right] e^{-t/T_g} \right\} \quad (2.2b)$$

Oznake pomenijo:

Z_b vrednost obremenilne impedance

Z vrednost celotne impedance tokokroga $(= \sqrt{R_k^2 + X_k^2})$

$$R = R_k + R_b, X = X_k + X_b,$$

φ kot celotne impedance tokokroga $(= \arctg X/R)$

Prvi člen enačbe odgovarja stacionarnemu kratkostičnemu izmeničnemu toku. Drugi člen predstavlja trenutno vrednost obremenilnega toka (v času $t=0$ ob nastopu kratkega stika), medtem ko tretji člen predstavlja enosmerno komponento toka. Zadnja dva omenjena toka pojemata s časovno konstanto T_g primerjava slika 2.4.

Pri nastopu kratkega stika ima vklopni kot ob upoštevanju predhodne obremenitve velik vpliv. Vklopni kot lahko zapišemo z naslednjo enačbo:

$$\psi = \arctg \frac{\sin(\varphi_k - \varphi)}{\frac{I_k''}{I_b} - \cos(\varphi_k - \varphi)} \quad (2.3)$$

Trifazno omrežje

Za simetrično trifazno omrežje lahko uporabimo nadomestno stikalno shemo na sliki 2.8. (Dana poenostavitev je primerna tudi za izračun časovnega poteka kratkostičnega toka za tripolni kratki stik).

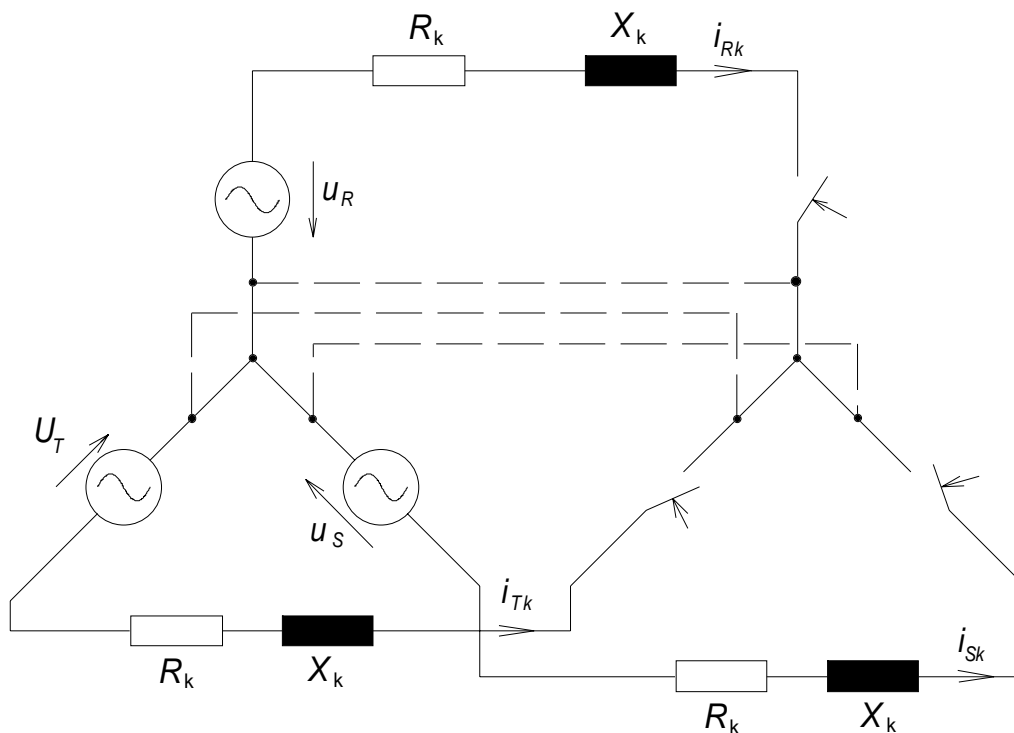
Predstavimo tri idealne napetostne izvore:

$$\begin{aligned} U_{L1} &= \sqrt{2}U \sin \omega t \\ U_{L2} &= \sqrt{2}U \sin(\omega t + 240^\circ) \\ U_{L3} &= \sqrt{2}U \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Temenska vrednost $\sqrt{2}U$ in krožna frekvenca sta konstantni; fazna premaknitev je 120° .

Impedance $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ nadzemnih vodov faze L1, L2 in L3 so po velikosti in po impedančnem kotu enako velike, konstantne in linearne. Do trenutka nastopa kratkega stika v času $t=0$ so toki $i_{L1k} = i_{L2k} = i_{L3k} = 0$. Nastop kratkega stika v treh fazah je možno vzpostaviti istočasno preko stikala (upornost stikala ne upoštevamo) v času $t=0$.

Na sliki 2.8 velja, da sta obe nični točki zvezde v vsakem trenutku enakega potenciala. Zaradi tega sta ti dve točki med seboj povezani, ne da bi se pri tem odražala sprememba v poteku tokov.



Slika 2.8

Nadomestna stikalna shema trifaznega omrežja brez obremenitve

Za predstavitev enačb treh kratkostičnih tokov, lahko trifazno omrežje razstavimo v tri fiktivne enofazne tokokroge (povezovalne črtkane linije na sliki 2.8)

Za kratkostične toke veljajo tri enačbe:

$$\begin{aligned} i_{Rk} &= \sqrt{2}I_k'' \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - e^{-t/T_g} \sin(\psi - \varphi_k) \right] \\ i_{Sk} &= \sqrt{2}I_k'' \left[\sin(\omega t + \psi + 240^\circ - \varphi_k) - e^{-t/T_g} \sin(\psi + 240^\circ - \varphi_k) \right] \\ i_{Tk} &= \sqrt{2}I_k'' \left[\sin(\omega t + \psi + 120^\circ - \varphi_k) - e^{-t/T_g} \sin(\psi + 120^\circ - \varphi_k) \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Na sliki 2.9a je predstavljen časovni potek napetosti in kratkostičnega toka za tripolni kratki stik v trenutku prehoda napetosti U_R skozi nič, kar odgovarja vklopnemu kotu $\psi=0$. Za vodnik R veljajo iste vrednosti, kot so bile upoštevane na sliki 2.3a. V primerjavi z izmeničnim tokokrogom na sliki 2.1, je pri tem prisotna bistvena razlika, ki se kaže v povratnih tokovih S in T v vodniku.

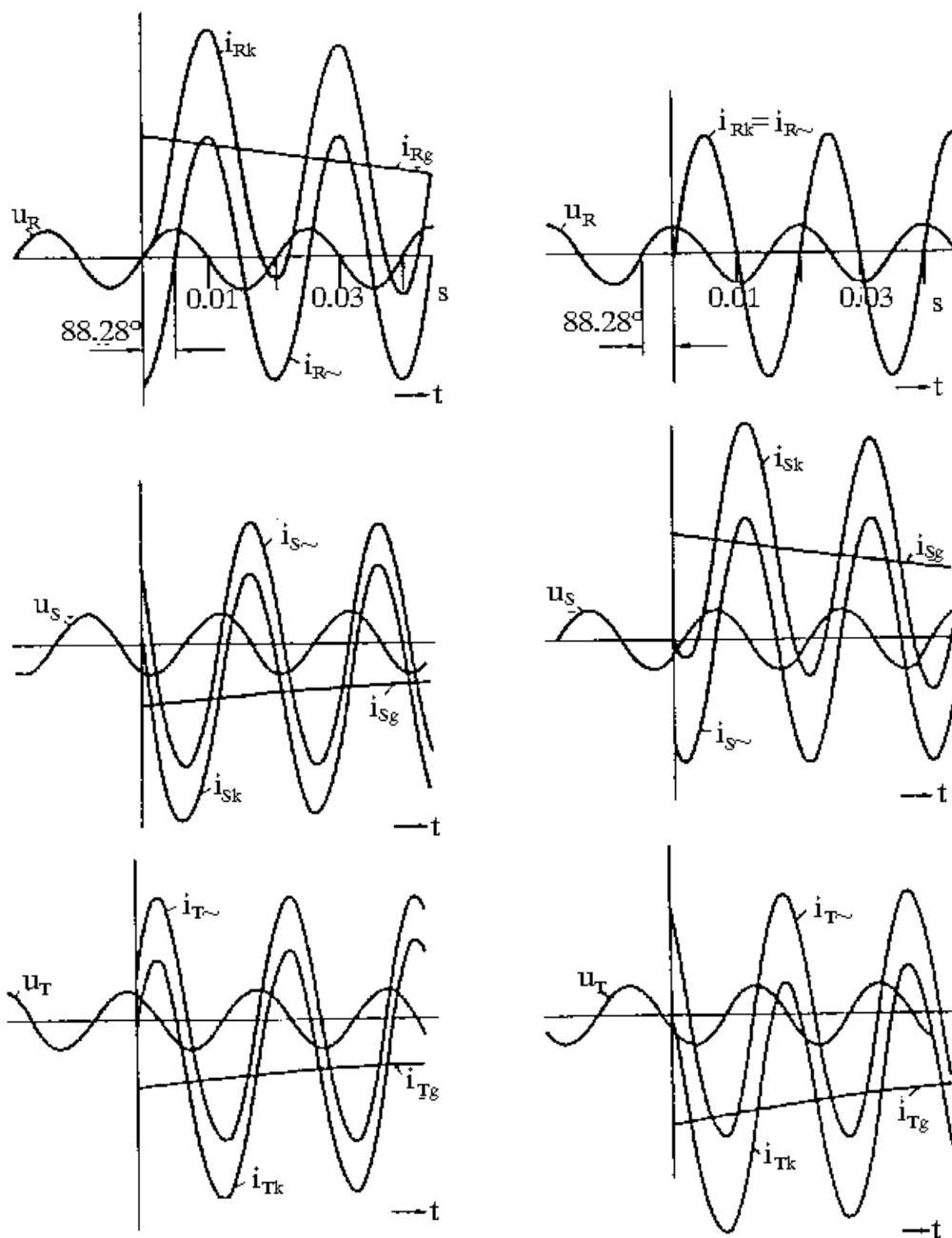
V navedenem primeru imajo impedance \underline{Z}_k skoraj povsem induktivni značaj tako, da je v času $t=0$ kratkostični izmenični tok $i_{S\sim} \approx i_{T\sim} \approx -0.5i_{R\sim}$. Za začetne vrednosti enosmerne komponente toka velja enaka medsebojna odvisnost. Zaradi tega je tudi asimetrična premaknitev kratkostičnih tokov i_{Sk} in i_{Tk} v primerjavi z i_{Rk} bistveno zmanjšana. Pri tripolnem kratkem stiku je prisotna simetrična obremenitev tudi med prehodnim pojavom kratkostičnega izmeničnega toka. V treh vodnikih so kratkostični toki in enosmerne

TOKOVNE OBREMENTIVNE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

komponente tokov različno veliki in povzročijo različne časovno spremenljive efektivne vrednosti.

Slika 2.9b odgovarja primeru, ko velja za vodnik R v času $t=0$ pogoj $\psi = \varphi_k$. Kratkostični tok i_{Rk} ne vsebuje enosmerne komponente toka in je enak kratkostičnemu izmeničnemu toku. Ta ugotovitev je v skladu s sliko 2.3b. V vodniku S in T sta si v času $t=0$ izmenična komponenta kratkostičnega toka ($i_{S-} = -i_{T-}$) in enosmerna komponenta toka ($i_{Sg} = -i_{Tg}$) medseboj v protifazi. Asimetrični potek kratkostičnega toka je nasproti nični vrednosti močnejši, kot je to primer na sliki 2.9a; prva tokovna temenska vrednost ne doseže največje možne vrednosti udarnega toka kratkega stika.

(Ker je v praksi najbolj pomembna ekstremna vrednost kratkostičnega toka, zadostuje, da pri tripolnem kratkem stiku opazujemo samo eno fazo).



$$\frac{R_k}{X_k} = 0.03; T_g = 0.11s$$

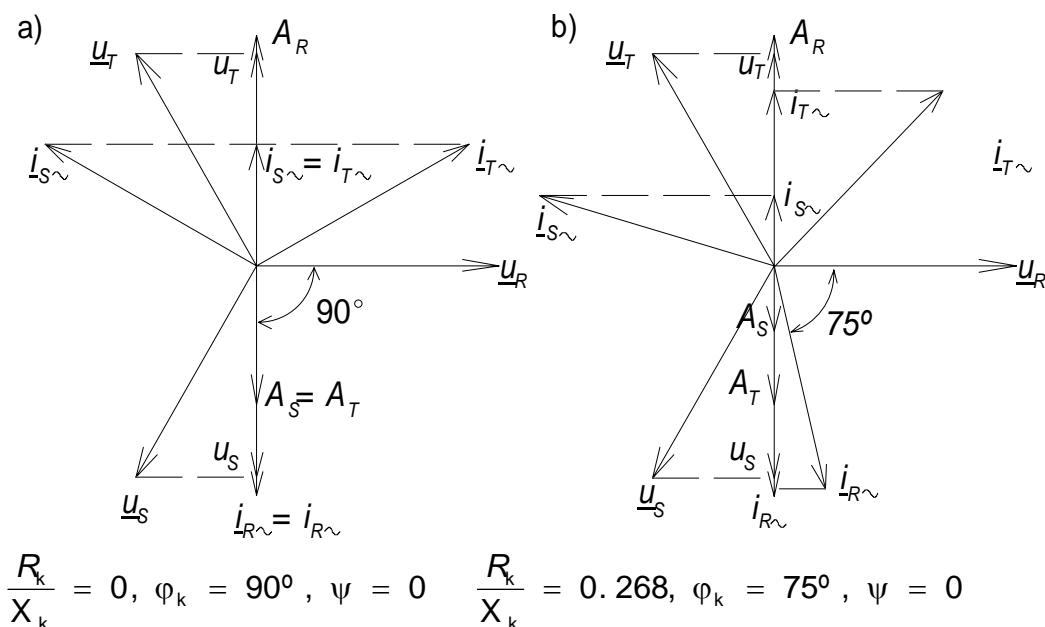
$$t = 0; \psi = 0 \quad \text{v vodniku R} \quad t = 0; \psi = \varphi_k$$

Slika 2.9

Potek napetosti in kratkostičnih tokov v vodnikih R, S in T.

Slika 2.10 velja za teoretičen primer čiste induktivne impedance $\underline{Z}_k = jX_k$. Kompleksni rotirajoči kazalec napetosti \underline{u}_R leži v odvisnosti od stikalnih pogojev v smeri realne osi. Napram kazalcu \underline{u}_R zaostaja napetost \underline{u}_S za 120° , medtem ko napetost \underline{u}_T prehiteva za 120° .

Kompleksni rotirajoči kazalci kratkostičnega izmeničnega toka $i_{R\sim}$, $i_{S\sim}$ in $i_{T\sim}$ zaostajajo za napetostmi za 90° . Tok $i_{R\sim}$ leži v negativnem delu imaginarne osi in odgovarja trenutku $i_R = -\sqrt{2}I_k''$. Trenutne vrednosti tokov $i_{S\sim}$ in $i_{T\sim}$ dobimo s projekcijo njihovih kompleksnih vrednosti na imaginarno os $i_{S\sim} = i_{T\sim} = 0.5\sqrt{2}I_k''$. Za začetno vrednost enosmerne komponente velja $A_R = \sqrt{2}I_k''$ in $A_S = A_T = -0.5\sqrt{2}I_k''$,



Slika 2.10

Diagram kompleksnih rotirajočih kazalcev in trenutne vrednosti napetosti in tokov pri različnih razmerjih R_k/X_k (pri $t=0$) je $u_R = 0$, ker morajo biti kratkostični tokovi (kot vsote enosmerne in izmenične komponente toka za čas $t=0$) vedno enaki vrednosti nič.

Slika 2.10b velja za impedanco omrežja $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ in za impedančni kot $\varphi_k = 75^\circ$. Čeprav vsebuje impedanca relativno veliko induktivno komponento je očitno, da je prisotna močna sprememba začetnega izmeničnega kratkostičnega toka in s tem tudi enosmerne komponente.

V primeru nastopa kratkega stika imajo specifične lastnosti generatorjev bistven vpliv na potek kratkostičnega toka. To je še posebno prisotno pri kratkem stiku na sponkah sinhronskega generatorja z dušilnim navitjem (turbogenerator). V praznem teku obratuje

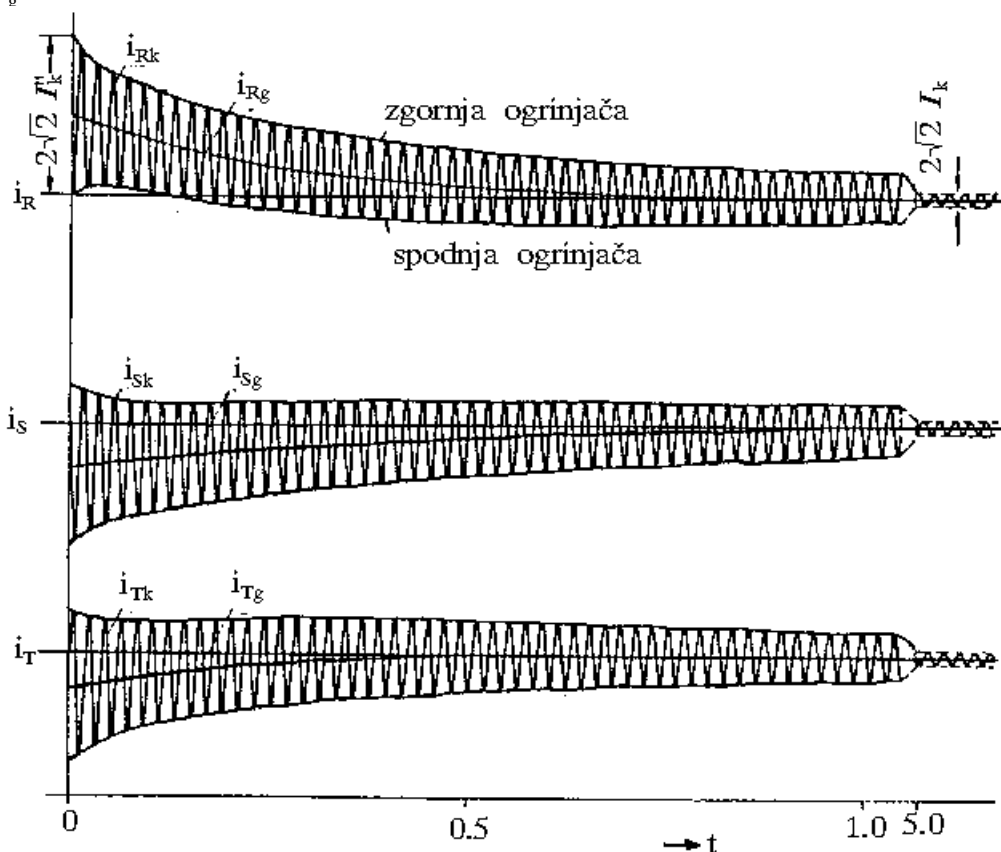
generator tako, da nastopa pri nazivnih vrtljajih in pri konstantnem vzbujanju na sponkah generatorja nazivna napetost. V primeru nastopa kratkega stika na sponkah generatorja v

trenutku, ko gre napetost u_R skozi nič, nastopi potek kratkostičnega toka i_{Rk}, i_{Sk} in i_{Tk} , kot kaže slika 2.11.

Tako, kot pri oddaljenih kratkih stikih od generatorja, tudi v tem primeru poraste kratkostični tok i_{Rk} na temensko vrednost imenovano udarni kratkostični tok in se nato izniha na trajni tok kratkega stika. Kratkostični toki kažejo asimetrični potek nasproti nični liniji in so odvisni od prisotnih izenačevalnih tokov. (Pri sinhronskih generatorjih so izmenični tokovi nizkih frekvenc, ki nastopajo skupno z upadajočo enosmerno komponento toka).

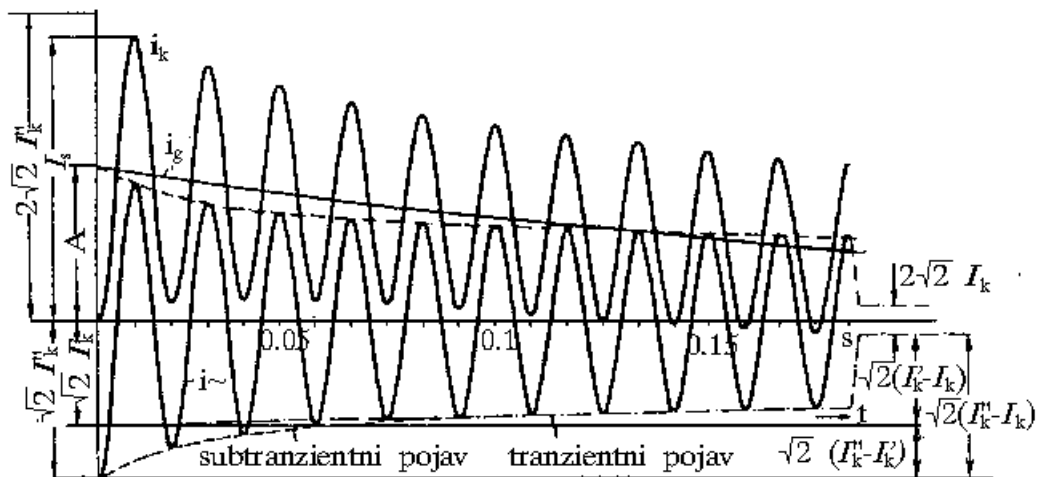
Ker lahko kratkostične impedance generatorjev predstavljamo kar z induktivno reaktanco, je ob kratkostičnih pogojih začetna enosmerna komponenta A približno enaka temenski vrednosti začetnega izmeničnega kratkostičnega toka $\sqrt{2}I_k''$. Skupni upadajoči potek ni torej le posledica samo enosmerne komponente ampak tudi posledica dušenja kratkostičnega izmeničnega toka.

Na sliki 2.12 je povečano predstavljen za vodnik R časovni potek kratkostičnega toka i_k, i_{\sim} in i_{\circ} .



Slika 2.11

Potek kratkostičnega toka pri kratkem stiku na sponkah turbogeneratorja v praznem teku, z nazivnim številom vrtljajev in nazivno napetostjo (pri $t=0$ in $u_g = 0$)



Slika 2.12

Potek kratkostičnega toka i_k in tokovnih komponent i_g in i_{\sim} v vodniku R.

Kratkostični izmenični tok lahko dokaj natančno razdelimo na

- trajni del,
- tranzientni del in
- subtranzientni del.

Ta potek kratkostičnega toka je vezan na nastopajoči elektromagnetni pojav v generatorju ter na posreden vpliv napetosti. Za predstavitev in izračun kratkostičnih razmerij, se v praksi izhaja iz konstantne napetosti in predpostavke, da je iznihajoči pojav kratkostičnega izmeničnega toka odvisen od naraščajoče generatorske reaktance (poglavje 2.3.2). Pripadajoče reaktance označujemo enako kot tokovna območja in sicer kot

- sinhronska reaktanca,
- tranzientna reaktanca in
- subtranzientna reaktanca.

Trajni del (stacionarni kratkostični izmenični tok, trajni tok kratkega stika) ima konstantno temensko vrednost $\sqrt{2}I_k$. Efektivna vrednost je kvocient nazivne napetosti $U_{\lambda N}$ in sinhronske reaktance X_d (delujoča reaktanca v času nastopajočega trajnega kratkostičnega toka - vpliv rotorja je upoštevan).

$$I_k = \frac{U_{\lambda N}}{X_d} \tag{2.6}$$

Stacionarnemu izmeničnemu toku se doda sorazmerno počasi iznihajoči tranzientni del. Ta pojav je bistveno povezan z reaktanco stresanja statorskega in vzbujevalnega navitja zato, ker se generator pri kratkem stiku vede kot kratkosklenjeni transformator. Reaktanca v tranzientnem delu je bistveno manjša, kot pri trajnem kratkostičnem toku.

Efektivna vrednost tranzientnega kratkostičnega izmeničnega toka je kvocient med napetostjo $U_{\lambda N}$ in tranzientno reaktanco X_d'

$$I_k' = \frac{U_{\lambda N}}{X_d'} \quad (2.7)$$

Tranzientnemu pojavu se na območju ene periode dodaja subtranzientni pojav (slika 2.12). Pri sinhronskih generatorjih z dušilnim navitjem se pojavi v tokokrogu izenačevalni pojav med dušilnim in izenačevalnim tokokrogom. Ta pojav, ki je prisoten v tokokrogu statorja, deluje na subtranzientni del kratkostičnega izmeničnega toka. Temu toku odgovarja začetna temenska vrednost začetnega kratkostičnega izmeničnega toka $\sqrt{2}I_k''$.

Efektivna vrednost subtranzientnega kratkostičnega izmeničnega toka je kvocient med napetostjo $U_{\lambda N}$ in sutranzientno reaktanco X_d''

$$I_k'' = \frac{U_{\lambda N}}{X_d''} \quad (2.8)$$

Pri sinhronskih strojih z lameliranimi poli brez dušilnega navitja ne nastopa subtranzientni pojav ($I_k' = I_k''$).

Časovni potek kratkostičnega toka od trenutka nastanka kratkega stika do stacionarnega stanja, lahko opišemo z naslednjo enačbo:

$$i_k = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{-t/T_d'} + (I_k' - I_k) e^{-t/T_d} + I_k \right] \sin(\omega t - \varphi_k) + \sqrt{2} I_k'' e^{-t/T_d} \sin \varphi_k \quad (2.9a)$$

Prvi člen enačbe predstavlja subtranzientni del kratkostičnega izmeničnega toka, drugi člen tranzientni del, tretji člen trajni del in zadnji člen enosmerno komponento toka. Krožna frekvenca ω je v praznem teku generatorja približno konstantna. Upoštevan je vklopni kot $\psi = 0^\circ$.

Časovni potek kratkostičnega toka je bil doslej opazovan zaradi trajanja izravnalnega pojava od nastopa kratkega stika do dosežene stacionarne vrednosti trajnega kratkostičnega toka. V praksi izvajamo hiter izklop kratkostičnega toka z odklopniki ali z ostalimi stikalnimi elementi. Trenutek izklopa je odvisen od najmanjše stikalne zakasnitve odklopnika. Glede na zaščito in vrsto stikala znaša v visokonapetostnih omrežjih ta čas med 0.06 in 0.2s, v posebnih primerih pod 0.06s. V nizkonapetostnih omrežjih se giblje ta najmanjša časovna zakasnitev najpogosteje v območju od 0.01 do 0.03s.

Omenjeno je bilo, da je generatorska napetost upoštevana kot konstantna vrednost, in da je iznihalni pojav kratkostičnega izmeničnega toka okarakteriziran z naraščajočo impedanco generatorja. Za izračun trenutnih vrednosti so potrebne

- subtranzientna reaktanca X_d''
- tranzientna reaktanca X_d'
- sinhronska reaktanca X_d

(Pripadajoče časovne konstante glej poglavje 2.3.5)

TOKOVNE OBREMENTITVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

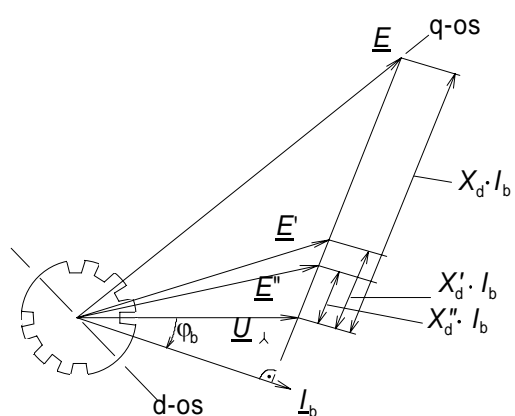
Indeks "d" pomeni, da je reaktanca reducirana na mesto rotorja, pri čemer se os navitja rotorja pokriva z osjo statorja (slika 2.15). Označujemo jo - vzdolžna os (direct axis). Poleg te reaktance se v generatorju pojavijo tudi reaktance v odgovarjajoči prečni osi (quadrature axis),

ki morajo biti ravnokotno znane za natančno simulacijo generatorskih stanj. Izračun kratkostičnih tokov lahko z zadostno natančnostjo izvedemo z vzdolžnimi reaktancami.

Subtranzientna reaktanca X_d'' obsega stresano reaktanco statorskega in rotorskega navitja, pri čemer so v stresanju rotorja zajeti vplivi dušilnega navitja ali vplivi palic v masivnem rotorskem delu. (Subtranzientna reaktanca je znana tudi pod imenom udarna stresana reaktanca ali začetna reaktanca.).

Tranzientno reaktanco X_d' sestavljajo stresana reaktanca statorja in vzbujevalnega navitja generatorja. Ta reaktanca je večja kot subtranzientna reaktanca ($X_d'/X_d'' \approx 1.2$ do 1.6). Če ima rotor generatorja lamelirane pole in jarme brez dušilnega navitja, je tranzientna reaktanca praktično enaka subtranzientni reaktanci. (Tranzientna reaktanca je označena tudi kot skupna reaktanca stresanja).

Sinhronska reaktanca X_d je sestavljena iz stresane statorske reaktance in reaktance rotorske povratne zveze (reaktanca glavnega polja).



a) Turbogenerator

b) Generator z izraženimi poli

Slika 2.15 Napetostni diagrami obremenjenih sinhronskih generatorjev.

Omenjene reaktance so združene pod pojmom sofazna reaktanca. Ker so reaktance odvisne od nasičenja, so vrednosti X_d'' in X_d' vrednosti nasičenja, medtem ko je za X_d uporabljena delno nasičena vrednost.

Protifazna reaktanca X_2 (inverzna reaktanca) je tista reaktanca generatorja, ki se pojavi, če generatorju v sinhronem teku pritisnemo nasproti se vrteči napetostni sistem. Ta ima napram rotorja dvojno relativno hitrost, medtem ko ima sofazni sistem napram rotorju relativno hitrost nič.

Za turbogeneratorje z dušilnim navitjem velja kot srednja vrednost

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \approx X_d''$$

Pri statorju z izraženimi poli in dušilnim navitjem je protifazna reaktanca največ okoli 20% večja od subtranzientne reaktance X_d'' .

Nična reaktanca je pri generatorjih odvisna le od stresanega polja zato, ker nični tokovni sistem ne proizvaja vrtilnega polja. Pri različnih izvedbah generatorjev je nična reaktanca celo manjša od subtranzientne reaktance ($X_0 \approx \frac{1}{6}$ do $\frac{3}{4} X_d''$). Nična reaktanca bo prisotna le v primeru nastopa krakatega stika med sponkami generatorja in zvezdiščem generatorskega navitja, ali pri zemeljskem kratkem stiku in posredni ali direktni ozemljitvi zvezdišča generatorja.

Če generatorju pri njegovi nazivni napetosti odvezamemo na statorskih sponkah nazivno obremenitev, se pojavijo notranje napetosti (zaradi napetostnih padcev na reaktancah) generatorja, ki so večje kot napetosti na sponkah. (Vzbujevalno navitje generatorja je pri tem obremenjeno z vzbujevalnim tokom).

Glede na subtranzientno, tranzientno in sinhrono reaktanco, govorimo tudi o subtranzientni napetosti E'' , tranzientni napetosti glavnega polja E' in napetosti z izraženimi poli E . Med kratkim stikom na sponkah neobremenjenega generatorja so prisotne samo napetosti $U_{\lambda 0} = E'' = E' = E_0$, medtem ko pri obremenjenem generatorju moramo v tem primeru upoštevati obremenilno stanje.

To razmerje je predstavljeno na sliki 2.15. Slika 2.15a velja za turbogenerator s popolnim dušilnim navitjem in z masivnim rotorjem (masivni valjasti stroj), slika 2.15b pa odgovarja generatorju z izraženimi poli. Pri strojih z izraženimi poli je sinhronska reaktanca X_q v prečni osi, prav zaradi izraženih polov manjša od sinhronske reaktance X_d v direktni osi (v sredini je $X_q \approx 0.6 X_d$, najpogosteje pa je razmerje $X_q''/X_d'' > 1$).

Iz omenjenega razloga imajo razlike v napetosti pri izračunu kratkostičnih tokov v začetnih periodah le neznamenit vpliv, tako da lahko izpeljane enačbe za turbogeneratorje z zadostno natančnostjo uporabljamo tudi za stroje z izraženimi poli.

Med napetostmi turbogeneratorja in napetostmi na priključnih sponkah U_{λ} obstajajo naslednje zveze (statorsko ohmsko upornost ne upoštevamo)

$$\underline{E}'' = \underline{U}_\lambda + jX_d'' \underline{I}_b \quad (2.13)$$

$$\underline{E}' = \underline{U}_\lambda + jX_d' \underline{I}_b \quad (2.14)$$

$$\underline{E} = \underline{U}_\lambda + jX_d \underline{I}_b \quad (2.15)$$

Pri obremenjenem stroju z nazivnim tokom in $\cos \varphi_N = 0.8$ (induktivno) dobimo naslednje vrednosti

$$E'' \approx (1.05 \text{ do } 1.23) U_{\lambda N}$$

$$E' \approx (1.08 \text{ do } 1.36) U_{\lambda N}$$

pri turbogeneratorjih in

$$E'' \approx (1.09 \text{ do } 1.28) U_{\lambda N}$$

$$E' \approx (1.13 \text{ do } 1.40) U_{\lambda N}$$

pri generatorjih z izraženimi poli

Napetosti rotorja z izraženimi poli so

$$E \approx (1.97 \text{ do } 3.20) U_{\lambda N}$$

pri turbogeneratorjih

$$E \approx (1.60 \text{ do } 2.44) U_{\lambda N}$$

pri generatorjih z izraženimi poli

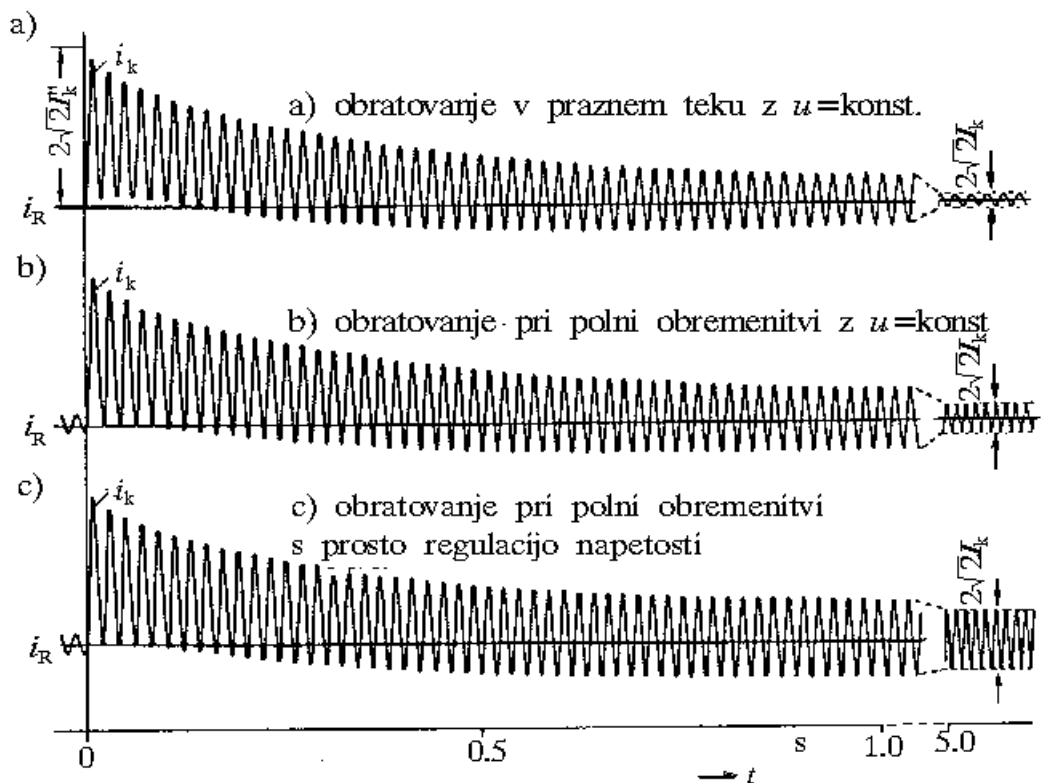
Nižje vrednosti veljajo za generatorje, ki imajo zračno hlajenje. Pri generatorjih z vodnim hlajenjem bodo dosežene zgornje vrednosti, zaradi velikega elektromagnetnega izkoristka.

Na sliki 2.16 je predstavljen primer časovnega poteka kratkostičnega toka i_k v vodniku faze R za tri obratovalna stanja.

Obratovanje v praznem teku (slika 2.16a) je bilo obširneje opisano v poglavju 2.3.1.

Pri polni obremenitvi s konstantno vzbujevalno napetostjo (slika 2.16a) prične kratkostični tok s trenutno vrednostjo obremenilnega toka. Napram obratovanju v praznem teku je začetna kratkostična vrednost toka višja iz razloga, ker subtranzienta napetost E'' preseže vrednost napetosti na priključnih sponkah. Začetna vrednost enosmerne komponente kratkostičnega toka bo sicer z obremenilnim tokom zmanjšana, vendar je kljub temu prva tokovna konica kratkostičnega toka malenkostno višja, kot v obratovanju v praznem teku. Zaradi višje konstantne napetosti vzbujanja je tudi trajni tok kratkega stika večji.

Generator ne daje na njegovih priključnih sponkah nikakršne moči v omrežje med trajanjem kratkega stika. Pogonska moč turbine ne more skokoma preiti na vrednost v praznem teku. Tako nastopi pospeševanje rotacijskih mas celokupnega agregata (energetska izravnava). Povečajo se vrtiljaji s tem tudi frekvenca. Potek vrtiljajev je pri tem bistveno vezan na vedenje turbinskega regulatorja.



Slika 2.16

Potek kratkostičnega toka i_{Rk} , za tri različne obratovalne primere turbogeneratorja z dušilnim navitjem.

Na (sliki 2.16b) naraste število vrtljajev najprej na okoli 110% nazivne vrednosti ter nato preide nazaj, skoraj na nazivno vrednost. Predno je doseženo stacionarno stanje lahko traja ta pojav več sekund. V praksi je zaradi tega n.pr. z zaščitno napravo izvedena demagnetizacija generatorja, da bi se tako izognili termični preobremenitvi.

Pri obratovanju s polno obremenitvijo z regulacijo napetosti (slika 2.16c) je po preteku kratkostičnega časa okoli 0.25s iznihan pojav kratkostičnega toka manj izrazit, kot pri obratovanju s polno obremenitvijo s konstantno napetostjo vzbujanja. To je zato, ker lahko z avtomatsko regulacijo vzbujevalna napetost naraste na zgornjo končno vrednost.

Trajni kratkostični tokovi so izpostavljeni različnim vplivnim veličinam. Poenostavljeni izračun poteka kratkostičnih tokov daje, ne oziraje se na obremenilno stanje, vzbujevalno in turbinsko regulacijo ter zaščitne naprave, zadostno natančne rezultate le v začetni periodi (do okoli 0.1s).

Sinhronski generator in impedanca omrežja

Na priključnih sponkah generatorja nastopa kratki stik relativno poredkoma. Impedanca omrežja Z_v je najpogosteje prisotna med kratkostičnim mestom in priključnimi generatorskimi sponkami; njen vpliv, na časovni potek kratkostičnih tokov, se povečuje z naraščanjem dela na takoimenovani kratkostični impedanci omrežja.

V enačbah (2.6) do (2.8) so za I_k'' , I_k' in I_k dodatno upoštevane poleg generatorskih impedanc tudi impedance omrežja. Pri tripolnem kratkem stiku veljajo z zadostno natančnostjo naslednje relacije

$$I_k'' = \frac{E''}{Z_k} = \frac{E''}{\sqrt{(R_G + R_V)^2 + (X_d'' + X_V)^2}} \quad (2.16)$$

$$I_k' = \frac{E'}{Z_k} = \frac{E'}{\sqrt{(R_G + R_V)^2 + (X_d' + X_V)^2}} \quad (2.17)$$

$$I_k = \frac{E}{Z_k} = \frac{E}{\sqrt{(R_G + R_V)^2 + (X_d + X_V)^2}} \quad (2.18)$$

Iz tega sledi, da z večanjem impedance omrežja zmanjšujemo diferenco med zgoraj navedenimi toki. Pri kratkih stikih, ki so oddaljeni od generatorja se vrednosti tokov približajo vrednosti stacionarnega kratkostičnega toka.

Časovne konstante

Za predstavitev časovnega poteka kratkostičnega toka, moramo poznati reaktance in pripadajoče časovne konstante.

Te so:

- subtranzientna časovna konstanta T_d'' ,
- tranzientna časovna konstanta T_d' in
- enosmerna časovna konstanta T_g .

Subtranzientna časovna konstanta T_d'' je vezana na zelo hitro iznihani del kratkostičnega toka. Odvisna je od dušilnih lastnosti električnega tokokroga, posebno pa od dušilnega navitja. Velja odnos

$$T_d'' = \frac{X_d'' + X_V}{X_d' + X_V} T_{d0} \quad (2.19)$$

pri tem je

X_V impedanca omrežja,

T_{d0} subtranzientna časovna konstanta v praznem teku v vzdolžni osi generatorja

Subtranzientni pojav je s tem omejen na manj polperiod. Vrsta kratkega stika (tri, dvo ali enopolni kratki stik) ima na velikost T_d'' samo malenkosten vpliv, ki ga ni potrebno upoštevati.

Tranzientna časovna konstanta T_d' se navezuje na bistveno počasnejši iznihalni del kratkostičnega toka. Ta je odvisna od dušilnih lastnosti vzbujevalnega tokokroga in bo vpliv nanjo, glede na vrsto kratkega stika večji, kot na T_d'' . Pri tri, dvo in enopolnem kratkem stiku dobimo torej različne vrednosti.

Pri tripolnem kratkem stiku velja za tranzientno časovno konstanto enačba

$$T'_d = \frac{X'_d + X_V}{X_d + X_V} T'_{d0} \quad (2.20)$$

Tranzientna časovna konstanta v praznem teku T'_{d0} (za vzdolžno os generatorja) je vezana na hitro spremembo vzbujevalne napetosti (časovna konstanta v praznem teku). Ker je sinhrona reaktanca X_d precej večja kot tranzientna reaktanca X'_d lahko T'_d doseže velikost T'_{d0} šele pri višjem deležu impendace omrežja (kratki stik oddaljen od generatorja).

Pri kratkem stiku na priključnih sponkah, torej $X_V = 0$, pade pri turbogeneratorjih večjih moči T'_d na okoli 1s, medtem ko pri strojih z izraženimi poli na 2s. Pri tem se izniha tranzientni pojav brez posredovanja vzbujevalne naprave najhitreje v 3 do 6s. Pri turbogeneratorjih majhnih moči je lahko $T'_d < 0,2$. Če impedanca omrežja ni pretežno induktivna, ampak ima relativno veliko ohmsko upornost R_V , potem velja za tranzientno konstanto razširjen odnos

$$T'_d = \frac{R_V^2 + (X'_d + X_V)(X_d + X_V)}{R_V^2 + (X_d + X_V)^2} T'_{d0} \quad (2.21)$$

Enosmerna tokovna konstanta T_g je odvisna od dušilnih lastnosti statorskega tokokroga (od razmerja reaktance in ohmske upornosti statorskega navitja) in od impendace omrežja. T_g je pri posameznih vrstah kratkih stikov praktično enako velika in se izračuna po enačbi:

$$T_g = \frac{X_2 + X_V}{\omega(R_G + R_V)} \approx \frac{X'_d + X_V}{\omega(R_G + R_V)} \quad (2.22)$$

kjer je R_G ohmska upornost statorskega navitja (rotorskega navitja) generatorja.

Za kratki stik na priključnih sponkah visokonapetostnega generatorja se giblje T_g v območju 0.07 do 0.1 s ($R_V = X_V = 0$).

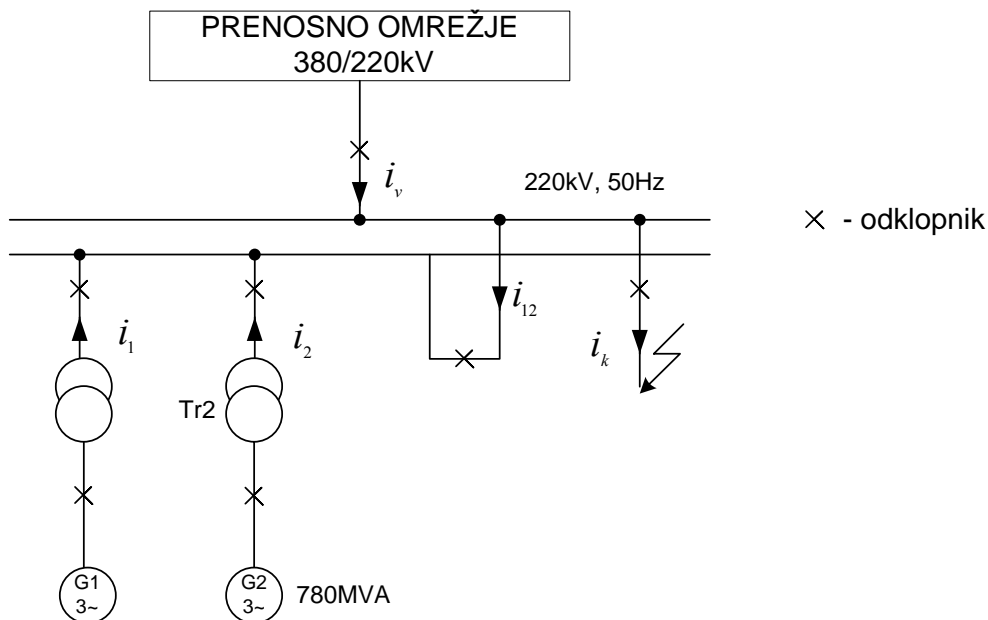
Pri kratkih stikih v omrežju bo enosmerna tokovna časovna konstanta toliko manjša, kolikor manjše bo razmerje X_V/R_V napram X_2/R_G oziroma X'_d/R_G . Enosmerni člen toka se izniha v nasprotju z izmeničnim členom hitreje, če je kratkostično mesto v omrežju, in če vsebuje impedanca omrežja večji del ohmske upornosti. (Časovne konstante za primer nastopa kratkega stika na priključnih sponkah generatorja dobimo iz enačb (2.19) do (2.22) tako, da vstavimo za X_V in R_V nične vrednosti).

Kratki stiki v povezanem obratovanju

V splošnem napaja omrežje več generatorjev različnih izvedb z različnimi nazivnimi močmi in zaščitnimi napravami. (Obratovanje enega samega sinhronskega generatorja na omrežje –

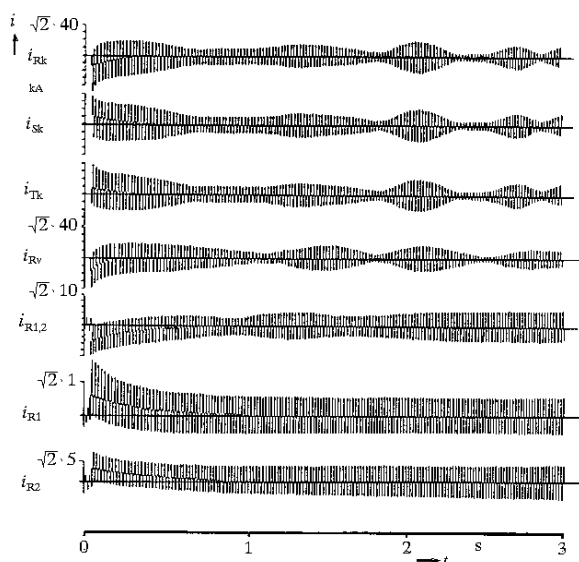
kot je bilo to dosedaj obravnavano - v praksi, razen v posebnih primerih - n. pr. nujno napajanje omrežja - ni priporočljivo). Na potek kratkostičnega toka vplivajo elektromehanične lastnosti paralelnega obratovanja generatorjev ter porabniki.

Slika 2.17 kaže stikalno shemo 220 kV zbiralk prenosnega omrežja 380/220 kV, v katerem paralelno obratuje 20 sinhronskih generatorjev (napajanje iz prenosnega omrežja). Zbiralke so



Slika 2.17

Stikalna shema 220kV stikališča priključenega na 380/220 kV prenosno omrežje



Slika 2.18

Potek kratkostičnih tokov i_{RK} , i_{SK} , i_{TK} in delnih kratkostičnih tokov i_R pri tripolnem kratkem stiku v 220 kV stikališču prenosnega omrežja.

posebej dodatno napajanje s strani generatorjev G1 in G2, preko posameznih transformatorjev.

Na nakazanem 220 kV odcepu od zbiralk predvidevamo nastop tripolnega kratkega stika v točki F v trenutku prehoda napetosti u_R skozi nič. Na sliki 2.18 je za primer kratkega stika na 220 kV odvodu prikazan potek skupnih kratkostičnih tokov i_{RK} , i_{SK} in i_{TK} in delnih kratkostičnih tokov i_{RV} , $i_{R1,2}$, i_{R1} in i_{R2} z največjo enosmerno komponento kr.st. toka.

Skupni kratkostični tok dopušča okoli 0.25s trajajoči iznihalni pojav. V nadaljnjem poteku pride do različnih elektromehanskih izenačevalnih pojavov na strani proizvodnih enot, kot tudi porabnikov, kar ima za posledico nestabilnost (asinhronski potek). Zaradi tega pokaže vsota vseh delnih kratkostičnih tokov velike modulacije. Ker generatorja G1 in G2 napajata preko transformatorjev neposredno mesto napake, ne bo njihov prispevek k skupnemu kratkostičnemu toku, zaradi ostalih proizvodnih enot v omrežju, v ničemer drugačen. Delni kratkostični tok $i_{R1,2} = i_{R1} + i_{R2}$ kaže tudi na to, da se oba generatorja vedeta med seboj asinhrono.

Za vsako poljubno kratkostično mesto v prenosnem omrežju dobimo drugačen časovni potek kratkostičnega toka. Če nastopi v času kratkostičnega pojava med proizvodnimi enotami nestabilen pojav, se ne more pojaviti stacionarni trajni tok kratkega stika.

Na sliki 2.18 je predstavljen potek kratkostičnih tokov brez upoštevanja zaščitnih naprav z namenom, da se ugotovi dalj časa trajajoči kratki stik. Take raziskave izvedemo lahko le na osnovi uporabe odgovarjajočih modelnih naprav ali primernih računalniških programov.

3.3 Uporaba klasičnih metod za izračun kratkih stikov

Impedance obratovalnih elementov

V nasprotju z nadzemnimi vodi in kabli na splošno ne izražamo impedance in reaktance za generatorje, transformatorje in dušilke v absolutnih vrednostih ohm/fazo, ampak, kot relativne vrednosti (v per unit ali v %). Podatek na fazo pomeni, da gre za vrednost impedance ene faze, ki je vezana v zvezdo oziroma trikot in preračunana na impedanco zvezde. Med absolutno vrednostjo v ohmih in relativno vrednostjo, velja naslednja zveza

$$Z_k = z_N \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} = z_N \frac{U_N^2}{S_N} \quad (z_N \text{ v per unit}) \quad (5.1)$$

ali

$$Z_k = \frac{z_N}{100\%} \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} = \frac{z_N}{100\%} \frac{U_N^2}{S_N} \cdot (z_N \text{ v } \%) \quad (5.2)$$

Pri tem pomeni

- Z_k absolutna kratkostična impedanca v ohm/fazo,
- z_N relativna vrednost kratkostične impedance, reducirane na nazivno napetost, ki mora biti pri kratkosklenjenem navitju prisotna, da steče nazivni tok (kratkostična napetost),

U_N nazivna napetost

I_N nazivni tok

S_N nazivna moč.

Napajanje iz omrežja

Pri omrežnem napajanju (slika 5.1) je za velikost kratkostičnega toka pomembno, kakšna je prisotna kratkostična moč na kratkostičnem mestu Q.

Ta je

$$S_{kQ}'' = \sqrt{3} U_{NQ} \cdot I_{kQ}'' ; I_{kQ}'' = \frac{1.1 U_{NQ}}{\sqrt{3} Z_Q}$$

in

$$Z_Q = R_Q + jX_Q$$

tako dobimo kratkostično impedanco

$$Z_Q = 1.1 \frac{U_{NQ}^2}{S_{kQ}''} \quad (5.3)$$

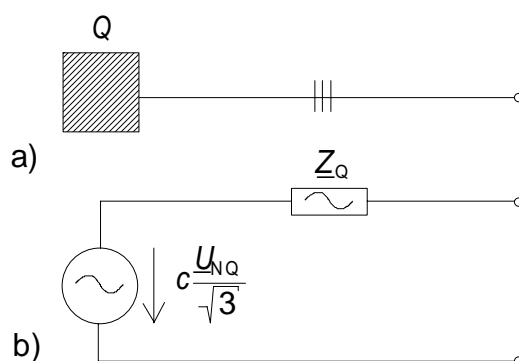
kjer pomeni

U_{NQ} nazivna napetost omrežja na priključnem mestu Q; faktor 1.1 odgovarja faktorju c. Faktor c definira povišanje napetosti ob nastopu kratkega stika.

S_{kQ}'' začetna kratkostična izmenična moč v Q,

I_{kQ}'' začetni kratkostični izmenični tok v Q.

V kolikor nam podatki niso znani, lahko za upornost upoštevamo vrednosti $R_Q = 0.1 X_Q$ in $X_Q = 0.995 Z_Q$.



a) Obratovalni element

b) Nadomestna stikalna shema

Slika 5.1 Napajanje z omrežja Q

Sinhronski stroji

Začetna reaktanca X_d'' (nasičena subtranzientna reaktanca) sinhronskega stroja (slika 5.2) določa velikost začetnega kratkostičnega impedančnega toka. Impedanca generatorja je:

$$\underline{Z}_G \approx (R_G + jX_d'')$$

$$X_d'' = \frac{x_d''}{100\%} \times \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} \quad (5.4)$$

oznake imajo naslednji pomen:

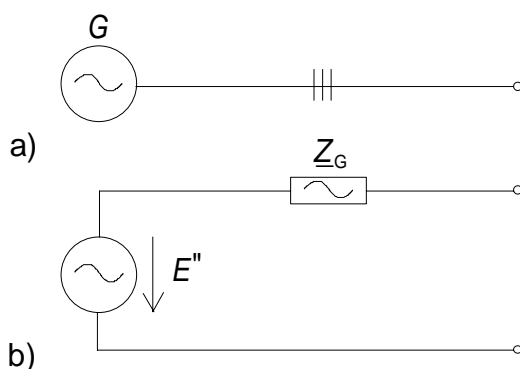
- S_{NG} generatorska nazivna moč,
- U_{NG} generatorska nazivna napetost,
- x_d'' relativna začetna reaktanca (reducirana udarna reaktanca ali subtranzientna vzdolžna reaktanca), v %.

Za R_G lahko z zadostno natančnostjo upoštevamo:

- $R_G = 0.05x_d''$ pri generatorjih z $U_{NG} > 1 \text{ kV}$ in $S_{NG} \geq 100 \text{ MVA}$
- $R_G = 0.07x_d''$ pri generatorjih z $U_{NG} > 1 \text{ kV}$ in $S_{NG} < 100 \text{ MVA}$ kakor tudi
- $R_G = 0.15x_d''$ pri generatorjih z $U_{NG} < 1000 \text{ V}$

Generatorje, ki obratujejo paralelno, z enako začetno reaktanco, lahko nadomestimo z enim generatorjem, katerega moč je vsota vseh moči.

Sinhronski motorji in sinhronski stroji za jalovo moč, se pri ktrakem stiku vedejo, kot generatorji.



- a) Obratovalni element
- b) Nadomestna shema

Slika 5.2 Generator G

Asinhronski motorji

Aktivno impedanco potrebno za izračun začetnega kratkostičnega izmeničnega toka (slika 5.3) določimo iz zagonskega toka motorja pri motorski napetosti. Ta je

$$\underline{Z}_M = R_M + jX_M \text{ in}$$

$$Z_M = \frac{U_{NM}}{\sqrt{3}I_{an}} = \frac{1}{I_{an} / I_{NM}} \frac{U_{NM}^2}{S_{NM}}. \quad (5.5)$$

pri tem pomenijo:

U_{NM} nazivna napetost motorja,

I_z zagonski tok motorja,

I_{NM} nazivni tok motorja,

S_{NM} nazivna moč motorja.

Za R_M lahko z zadostno natančnostjo vstavljamo:

$$R_M / X_M = 0.10 \text{ z } X_M = 0.995 Z_M$$

pri visokonapetostnih motorjih (moč/polov par > 1 MW),

$$R_M / X_M = 0.15 \text{ z } X_M = 0.989 Z_M$$

pri visokonapetostnih motorjih (moč/polov par < 1 MW) in

$$R_M / X_M = 0.30 \text{ z } X_M = 0.958 Z_M$$

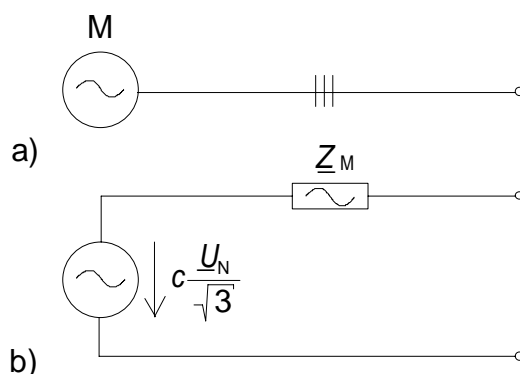
pri niskonapetostnih motorjih.

Z usmerniškiimi pogoni moramo ravnati tako, kot z asinhronskimi motorji. Za te pogone vstavljamo:

U_{NM} nazivno napetost na strani omrežja usmernika oziroma usmerniškega transformatorja,

I_{NM} nazivni tok na strani omrežja in

$$I_z / I_{NM} = 3 \quad \text{in} \quad R_M = 0.1 X_M \quad \text{z} \quad X_M = 0.995 Z_M.$$



a) Obratovalni element

b) Nadomestna stikalna shema

Slika 5.3 Motor M

Transformatorji

Nadomestna stikalna shema sofaznega, protifaznega in ničnega sistema, je dobljena na osnovi števila in vezave navitij transformatorjev. Protifazna impedanca je po iznosu identična sofazni impedanci.

Sofazna impedanca

Sofazna impedanca regulacijskega transformatorja, je enaka kratkostični impedanci. Lahko jo izmerimo ali izračunamo s kratkostično napetostjo in nazivno močjo, reducirano na zgornji ali spodnji napetostni nivo.

Da bomo lahko razlikovali indekse za simetrične komponente 1,2,0, bodo uporabljene alfabetske oznake za transformatorska navitja in sicer p (primar), s (sekundar) in t (terciar).

Transformator z dvema navitjema

Slika 5.4 prikazuje enopolno stikalno shemo trifaznega transformatorja.

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{ps} = \underline{Z}_T = R_T + jX_T$$

Sofazno impedanco v glavnem določa stresani fluks med primarnim in sekundarnim navitjem.

Impedanco Z_T izračunano iz kratkostične napetosti u_k transformatorja

$$Z_T = \frac{u_{kN}}{100\%} \cdot \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} \quad (5.6)$$

pri čemer je ohmska upornost

$$R_T = \frac{u_{RN}}{100\%} \cdot \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} = \frac{P_{CuN}}{3I_{NT}^2} \quad (5.7)$$

in induktivna upornost

$$X_T = \frac{u_{xN}}{100\%} \cdot \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} = \frac{1}{100\%} \cdot \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} \sqrt{u_{kN}^2 + u_{RN}^2} \quad (5.8)$$

kjer pomeni:

U_{NT} nazivna napetost transformatorja,

S_{NT} nazivna moč transformatorja,

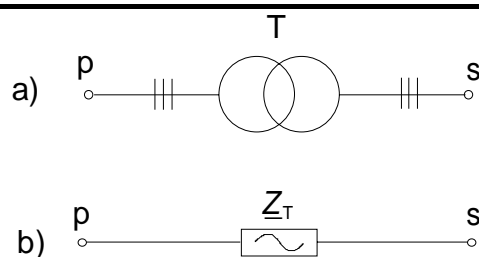
u_{kN} nazivna kratkostična napetost v %,

u_{RN} ohmski nazivni padec napetosti (kratkostične izgube) v %,

u_{xN} nazivna napetost stresanja v %

P_{CuN} izgube v bakru pri nazivni moči,

I_{NT} nazivni tok transformatorja



Slika 5.4
Dvonavitni transformator

- a) Obratovalni element
- b) Nadomestna stikalna shema

Transformator s tremi navitji

Transformator s tremi navitji bo v sofaznem in protifaznem sistemu predstavljen z nadomestno shemo, v kateri so tri razpoložljive impedance združene v ekvivalentno impedančno zvezdo (slika 5.5). Impedance bodo izračunane iz kratkostičnih napetosti in pripadajočih moči, reduciranih na eno od treh nazivnih napetosti transformatorja. Zaradi negativnega člena lahko postane ena od treh impedanc nič ali negativna. Tako je

$$\begin{aligned}
 Z_p &= \left(\frac{u_{ps}}{S_{ps}} + \frac{u_{tp}}{S_{tp}} - \frac{u_{st}}{S_{st}} \right) \left(\frac{U_N^2}{2 \cdot 100\%} \right) \\
 Z_s &= \left(\frac{u_{st}}{S_{st}} + \frac{u_{ps}}{S_{ps}} - \frac{u_{tp}}{S_{tp}} \right) \left(\frac{U_N^2}{2 \cdot 100\%} \right) \\
 Z_t &= \left(\frac{u_{tp}}{S_{tp}} + \frac{u_{st}}{S_{st}} - \frac{u_{ps}}{S_{ps}} \right) \left(\frac{U_N^2}{2 \cdot 100\%} \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

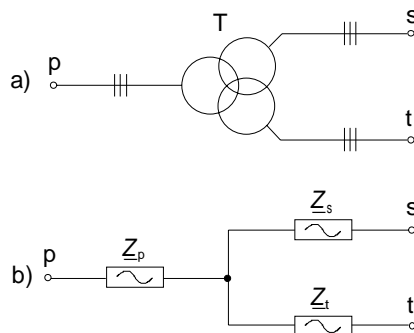
pri tem predstavljajo:

$\left. \begin{matrix} u_{ps} \\ u_{st} \\ u_{tp} \end{matrix} \right\}$ kratkostična napetost v %

U_N reducirana napetost (ena od treh nazivnih napetosti)

$\left. \begin{matrix} S_{ps} \\ S_{st} \\ S_{tp} \end{matrix} \right\}$ nazivna prehodna moč

(kratkostične napetosti in nazivne prehodne moči med posameznimi navitji)



Slika 5.5 Tronavitni transformator

- a) Obratovalni elemen
- b) Nadomestna stikalna shema

Nična impedanca

Nična impedanca trifaznih transformatorjev, je odvisna od vezave navitij in od zgradbe jedra - trojedrni, pet jedrni, enofazni transformator. V omrežju lahko nični sistem obstaja le takrat, kadar je najmanj eno navitje vezano v zvezdi, in je zvezdiščna točka vezana z zemljo direktno ali preko induktivne ali ohmske upornosti. Izjema je autotransformator, kjer nična impedanca obstaja tudi, če ni izvedena ozemljitev z zvezdiščem. Dodatna impedanca zvezdiščne točke bo upoštevana pri enopolni nadomestni shemi s trikratno vrednostjo, to je $3Z_E$.

Na sliki 5.6 je za primer dana vezava za merjenje nične impedance transformatorja zvezda - zvezda s trikotnim izenačevalnim navitjem. Meritev impedance praznega teka Z_{0L} in kratkostične impedance Z_{0k} lahko izvajamo na višjem napetostnem nivoju p (meritev a) in nižjem napetostnem nivoju s (meritev b).

Za enopolno nadomestno shemo ničnega sistema (slika 5.6c) lahko izračunamo zahtevane nične impedance s pomočjo izmerjenih ničnih impedanc praznega teka in ničnih kratkostičnih impedanc, na osnovi relacij v nadaljevanju. Pri tem so vse vrednosti za predstavljen primer reducirane na enotno napetost primarne strani označene s p.

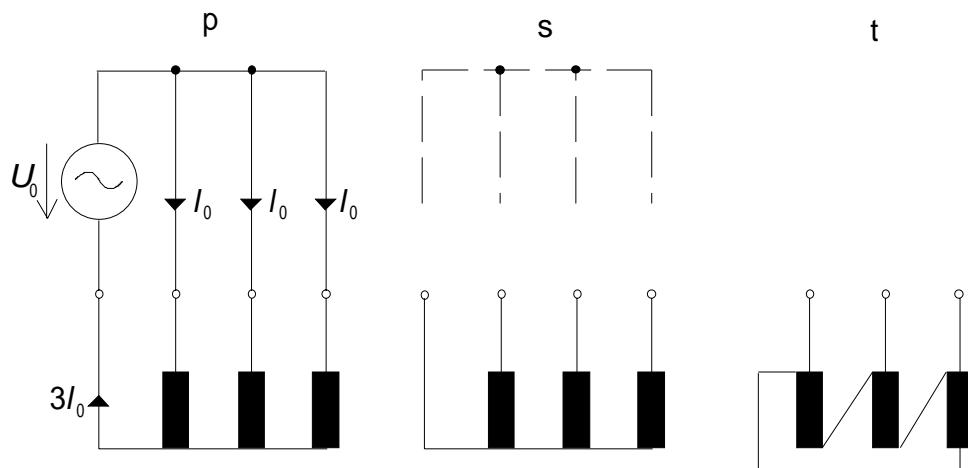
Tako velja:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{0pL} &= \underline{Z}_{0p} + \underline{Z}_{0t}^p & \underline{Z}_{0sL}^p &= \underline{Z}_{0sL} \cdot (p / s)^2 \\
 \underline{Z}_{0pk} &= \underline{Z}_{0p} + (\underline{Z}_{0s}^p \parallel \underline{Z}_{0t}^p) & \underline{Z}_{0s}^p &= \underline{Z}_{0s} \cdot (p / s)^2 \\
 \underline{Z}_{0sL}^p &= \underline{Z}_{0s}^p + \underline{Z}_{0t}^p & \underline{Z}_{0t}^p &= \underline{Z}_{0t} \cdot (p / s)^2
 \end{aligned}$$

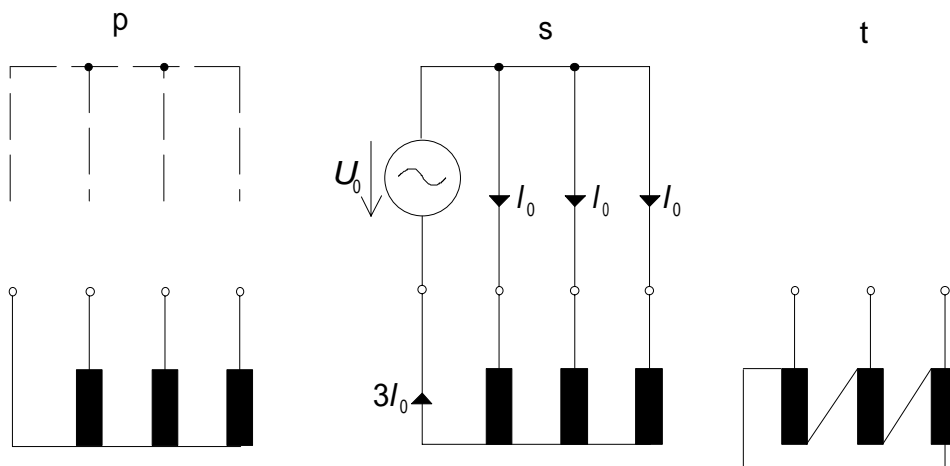
iz tega sledi

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{0p} &= \underline{Z}_{0pL} - \underline{Z}_{0t}^p \\
 \underline{Z}_{0s}^p &= \underline{Z}_{0sL}^p - \underline{Z}_{0t}^p
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

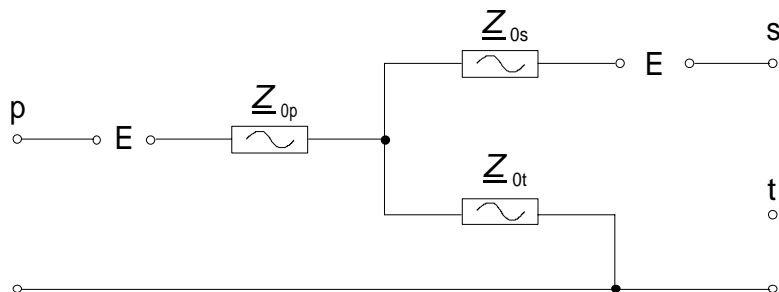
$$\underline{Z}_{0t}^p = \sqrt{(\underline{Z}_{0pL} - \underline{Z}_{0pk}^p) \underline{Z}_{0sL}^p}$$



- a) Meritev na primarni strani p,
 nična impedanca praznega teka \underline{Z}_{0pL} (sekundarno navitje je odprto),
 kratkostična nična impedanca \underline{Z}_{0pk} (primarno navitje p je kratko sklenjeno)



- b) Meritev na sekundarni strani s,
 nična impedanca praznega teka \underline{Z}_{0sL} (primarno navitje p je odprto)
 kratkostična nična impedanca \underline{Z}_{0sk} (primarno navitje p je kratko sklenjeno)



- c) Nadomestna shema ničnega sistema (E je povezava zvezdiščne točke z zemljo)

Slika 5.6
 Meritev nične impedance \underline{Z}_0 na transformatorju s tremi navitji YNyn(d)

Na sliki 5.7 so za najpogostejše vezave transformatorjev z dvema in tremi navitji prikazane enopolne nadomestne sheme za sofazni in nični sistem.

Pri transformatorjih z dvojn timer navitjem z vezavo zvezda-trikot in ozemljenim zvezdiščem, bo pretok fluksa zaradi ničnih tokov kompenziran s protiampernimi ovoji v trikotnem navitju in stresanim fluksom v jarmu. Nična impedanca je nekoliko manjša, kot kratkostična impedanca ($Z_0 \approx 0,8 Z_T$).

Pri transformatorjih z dvema navitjema v vezavi zvezda - zvezda z ozemljenim zvezdiščem primarja, lahko teče nični fluks, zaradi manjkajočih ampernih ovojev, samo preko zraka, kotla in razpoložljivih železnih delov. Pri petstebernem jedru (prerez jarma je manjši, kot pri tristebernem jedru) se zaključuje nični fliks preko dodatnih stebrov. Pri enofaznih transformatorjih in trifaznih oklopljenih transformatorjih, je ničnemu fluksu na razpolago celotni prerez jedra tako, da nična impedanca (ker na sekundarni strani ne obstajajo protiamperni ovoji) ustreza impedanci praznega teka ($Z_0 = Z_L$). Pri petstebernem transformatorju, je nična impedanca zaradi zmanjšane prereza jarma manjša, kot impedanca praznega teka ($Z_0 < Z_L$). Pri tristebernem transformatorju je Z_0 zaradi manjkajoče povratne povezave preko železa znatno manjša, kot impedanca praznega teka ($Z_0 \ll Z_L$) in je lahko dobljena le na osnovi meritev.

Transformator z dvema navitjema, v vezavi zvezda-cik cak, z ozemljenim zvezdiščem navitja v zvezdi, se vede z ozirom na nično impedanco, kot transformator v vezavi, zvezda - zvezda. Če je cik cak navitje ozemljeno, bo v nasprotju s prejšnjim primerom, nični fluks kompenziran preko protiamperskih ovojev delnih navitij, ki so na istih stebrih. Nična impedanca je potem (0.10 do 0.15) Z_T .

Pri transformatorju s tremi navitji v vezavi zvezda-zvezda-trikot in primarno ozemljeno zvezdiščno točko, dobimo za nično impedanco enake razmere, kot pri transformatorjih z dvojn timer navitjem v vezavi zvezda-trikot. Če bo sekundarna stran zvezdišča ozemljena, bo nična impedanca transformatorja znova reducirana seveda ob pogoju, da je hkrati zvezdišče sekundarnega omrežja ozemljeno.

Nični sistem se lahko izoblikuje tudi pri avtotransformatorjih v vezavi zvezda-zvezda z neozemljeno zvezdiščno točko. Zaključuje se preko zaporednega navitja avtotransformatorja. Dodatno trikotno izenačevalno navitje zmanjšuje nično impedanco.

Pri ozemljenem zvezdišču avtotransformatorja in neozemljeni zvezdiščni točki sekundarnega omrežja, veljajo za nični sistem podobni pogoji, kot za transformator v vezavi zvezda-zvezda (z in brez trikotnega navitja). V kolikor je zvezdišče vendarle ozemljeno, je razdelitev ničnih tokov odvisna od obstoječega trikotnega izenačevalnega navitja. Pri dodatni ozemljitvi zvezdiščne točke primarnega omrežja, se bodo v sekundarnem omrežju nastali nični tokovi v

avtotransformatorju transformirali na primarno stran; tako se torej nični tokovi, ki tečejo preko zaporednega navitja, razdelijo na paralelno navitje in na sekundarno omrežje.

Trikotno izenačevalno navitje zmanjšuje velikost rezultirajoče nične impedance tako dolgo, dokler je nična impedanca avtotransformatorja aktivna.

TOKOVNE OBREMENTITVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

Konstrukcija jedra ima pri avtotransformatorju enak vpliv na velikost nične impedance, kot pri polnih transformatorjih.

Vezava	Protifazni in sofazni sistem	Ni~ni sistem
	<p style="text-align: center;">1(2)</p>	
	<p style="text-align: center;">1(2)</p>	
	<p style="text-align: center;">1(2)</p>	
	<p style="text-align: center;">1(2)</p>	
	<p style="text-align: center;">1(2)</p>	<p style="text-align: center;">$Z_{E s}^p = Z_{E s} \left(\frac{p}{s}\right)^2$</p>
	<p style="text-align: center;">1(2)</p>	<p style="text-align: center;">$Z_{E p} = Z_E \left(\frac{p}{s} - 1\right) ; Z_{E s} = Z_E \left(\frac{p}{s}\right) \left(\frac{p}{s} - 1\right)$ $Z_{E t} = Z_E \left(\frac{p}{s}\right)$</p>

Opomba: iz prevoda knjige R. Roeser-ja, *Kratkostični tokovi v trifaznih omrežjih* so povzeta določena poglavja. Zato poglavja ponekod ne sovpadajo z označevanjem enačb.

Slika 5.7

(Slika 5.7) Nadomestna stikalna shema za sofazni, protifazni in nični sistem dvo in trinavitnega transformatorja

Dušilke za omejevanje kratkostičnega toka

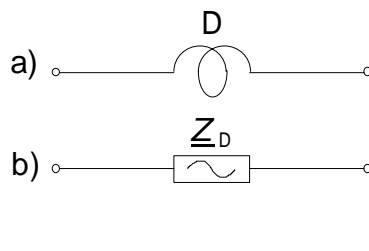
Impedance sofaznega, protifaznega in ničnega sistema so pri dušilkah (slika 5.8) za omejevanje kratkostičnih tokov enako velike in ustrezajo vzdolžni impedanci ($\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_0 = \underline{Z}_D$).

Ker je $R_D \cong 0.03 X_D$, ni nujno da R_D napram X_D upoštevamo. Tako velja

$$\underline{Z}_D \cong X_D = \frac{u_{ND}}{100\%} \cdot \frac{U_{ND}}{\sqrt{3} I_{ND}} = \frac{u_{ND}}{100\%} \cdot \frac{U_{ND}^2}{Q_{ND}} \quad (5.11)$$

Pri tem pomenijo:

- u_{ND} napetostni padec pri nazivnem toku v %
- U_{ND} nazivna napetost
- I_{ND} nazivni tok
- Q_{ND} nazivna moč



Slika 5.8

Dušilka za omejevanje kratkostičnega toka

- a) Obratovalni element
- b) Nadomestna shema

Zaporedno vezani kondenzatorji

Impedance sofaznega, protifaznega in ničnega sistema, so pri zaporedno vezanih kondenzatorjih (slika 5.9) enake vzdolžni impedanci ($\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_0 = \underline{Z}_C$).

Ker so izgube enake 0.2 do 0.45% moči kondenzatorja, ni nujno, da R_c napram X_c upoštevamo. Tako je

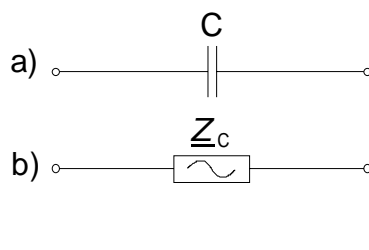
$$\underline{Z}_c \cong X_c = \frac{Q_{NC}}{3 I_{NC}^2} \quad (5.12)$$

Pri tem pomeni:

- Q_{NC} nazivna moč (trifazna moč)
- I_{NC} nazivni tok

TOKOVNE OBREMENITVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

Pri izračunu kratkostičnega toka ni potrebno upoštevati zaporedno vezanih kondenzatorjev, v kolikor so ti paralelno vezani z zaščitno napravo. V tem primeru se namreč kondenzatorji pri kratkem stiku vežejo na kratko (VDE0102 Teil1, 10b)



Slika 5.9 Zaporedni kondenzator

- a) Obratovalni element
- b) Nadomestna shema

Zbiralke v stikalnih napravah

Zbiralke so različne. Ločimo jih po obliki in po nazivnih podatkih določenega stikalnega postroja. Po obliki so lahko iz profiliranega vodnika, cevne vodnika ali vrvi, material pa je lahko baker, aluminij in aluminij/jeklo.

Ker so zbiralke relativno kratke, so tudi na splošno impedančne vrednosti (posebno pri postrojih, ki so za napetosti $>$ od 1kV) manjše v primerjavi z ostalimi impedančnimi vrednostmi (n.pr.generatorji, transformatorji itd.)

Nadomestna shema je v principu enaka, kot pri nadzemnih vodih (slika 5.10)

Kabel

Impedančne vrednosti so odvisne od prereza in materiala vodnika, vrste kabla, konstrukcije kabla, kakor tudi načina polaganja kabla. Pri nični impedanci pridejo v poštev tudi vplivi okolice, kot n.pr. paralelni kabli in metalni cevni vodi.

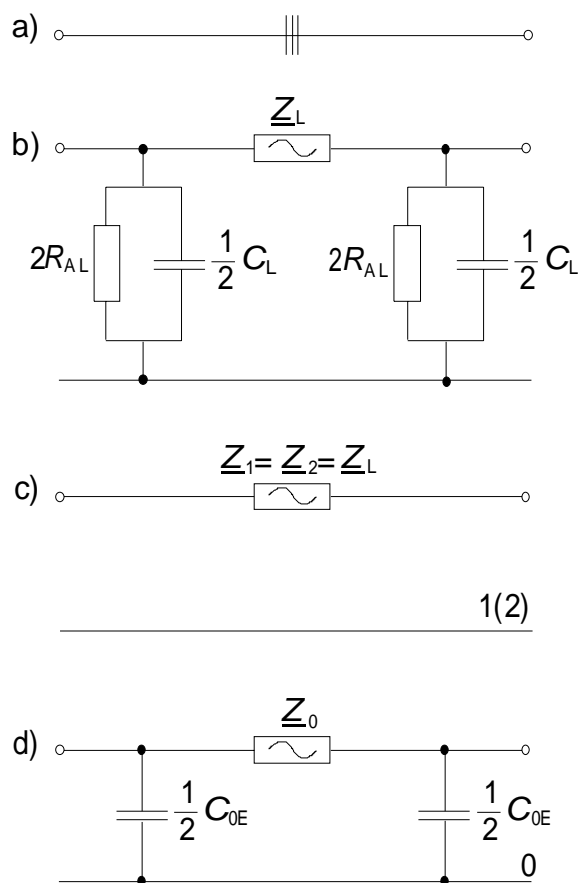
Zaradi tega ni možno podati enačbe za natančen izračun ohmske in induktivne upornosti. Impedančne vrednosti so dane od proizvajalca ali pa jih določimo z meritvijo. Slednje velja posebno za nične impedance.

Obratovalne impedance pri kablju so pogojene z zmanjšano razdaljo med vodniki in so v nasprotju s prostozračnimi vodi bistveno nižje. Kapacitivnosti so znatno večje, pri čemer so vrednosti sofaznega, protifaznega in ničnega sistema pri enožilnih kablju enake.

Nadomestna shema sofaznega in ničnega sistema ustreza nadomestni shemi za prostozračne vode (slika 5.10)

Nadzemni vodi

Slika 5.10 prikazuje enopolno nadomestno stikalno shemo prostožračnega voda (π - člen). Karakteristične vrednosti so določene z uporabljenim materialom in z obliko stebra. Vrednosti upornosti Z' , R' in X' so dane v W/km (reducirano na vodnik in sistem).



Slika 5.10 Trifazni prostožračni vod

- a) Obratovalni element
- b) Nadomestna shema (π - člen)
- c) Poenostavljena nadomestna stikalna shema sofaznega in protifaznega sistema
- d) Poenostavljena nadomestna stikalna shema ničnega sistema

Za induktivnost X_L nekega tokokroga bodo najpogosteje znane srednje vrednosti v odvisnosti od polmera vodnika in srednje medsebojne razdalje. Pri tem so upoštevane lastne in medsebojne induktivnosti vodnikov sistema. Prečne tokove, ki so posledica korone in obratovalne kapacitivnosti v neobremenjenih omrežjih, ne upoštevamo. Tako dobimo za sofazni in protifazni sistem prostožračnega voda poenostavljeno enopolno nadomestno shemo po sliki 5.10c.

Opomba: iz prevoda knjige R. Roeper-ja, *Kratkostični tokovi v trifaznih omrežjih* so povzeta določena poglavja. Zato poglavja ponekod ne sovpadajo z označevanjem enačb.

$\underline{Z}'_1 = \underline{Z}'_2 = \underline{Z}'_L = (R'_L + jX'_L)$ je obratovalna impedanca na km.

Nadomestna shema za nični sistem \underline{Z}_0 ima, do dozemne kapacitivnosti C_{0E} , analogno obliko (primer slike 5.10d).

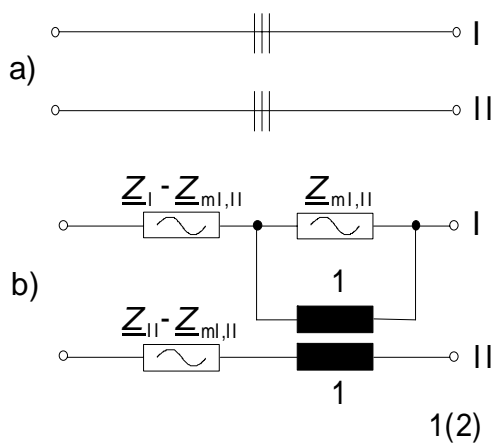
Pri dvojnih vodih nastopa poleg lastnih impedanc tako v sofaznem in protifaznem, kot v ničnem sistemu med obema sistemoma, obojestranska povezava. Slika 5.11 prikazuje poenostavljeno enopolno nadomestno shemo za sofazni in protifazni sistem dvojnega voda (sistem I in II). Na splošno je vpliv impedance na nasprotni strani majhen (<5% za sofazni in

protifazni sistem). Za enako velike toke in napetosti v obeh tokokrogih, uporabljamo za obratovalne impedance rezultirajoče karakteristične vrednosti.

V ničnem sistemu je vpliv nasprotne impedance velik (>30%) in mora biti upoštevan. Slika 5.12 prikazuje nadomestno shemo ničnega sistema za dvojni vod. Povratno delovanje eventuelne ozemljitvene vrvi, ki ima bistveni vpliv na nično impedanco, je v tem upoštevano.

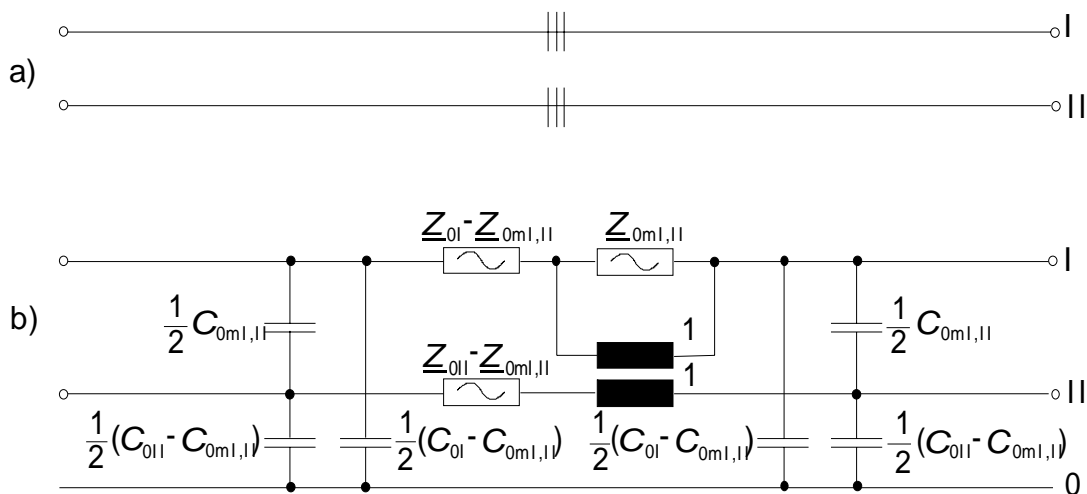
Tu pomeni:

- \underline{Z}_{0I} in \underline{Z}_{0II} nični impedanci pri odprtem drugem tokokrogu,
- C_{0I} in C_{0II} nični kapacitivnosti pri ozemljitvi drugega tokokroga,
- $\underline{Z}_{0ml,II}$ nasprotna nična impedanca,
- $C_{0ml,II}$ nasprotna nična kapacitivnost,
- 1:1 idealni transformator.



- a) Obratovalni element
- b) Nadomestna stikalna shema

Slika 5.11
Poenostavljena nadomestna stikalna shema sofaznega in protifaznega sistema dvojnega voda



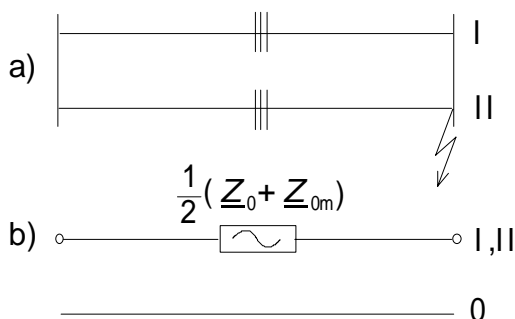
a) obratovalni element
 b) nadomestna shema

Slika 5.12
 Popolna nadomestna shema ničnega sistema dvojnega voda ($R_{AI} = 0$)

Izračun rezultirajoče nične impedance lahko podamo na dveh primerih enopolne nadomestne sheme z upoštevanjem nasprotnih impedanc. Kapacitivnosti pri tem ne upoštevamo.

Slika 5.13 prikazuje dvojni vod z dvema enakima prenosnima sistemoma, enakega prereza in enake napetosti. Oba sistema sta na začetku in koncu med seboj povezana. Kratkostično mesto je na koncu voda.

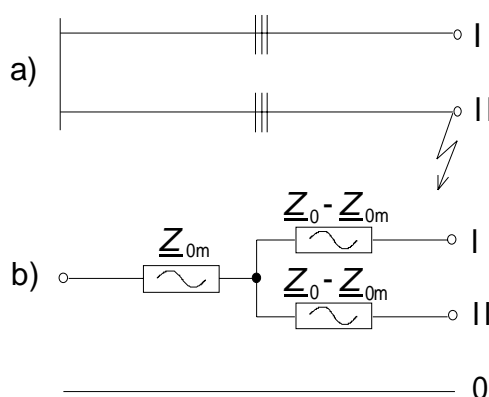
Slika 5.14 prikazuje enak dvojni vod kot sliki 5.13, le, da sta oba vodnika med seboj povezana samo na začetku. Oba konca voda sta odprta zato, ker sta vodnika vezana n.pr. na različne zbiralke. Kratkostično mesto je na koncu enega voda.



a) Obratovalni element
 b) Nadomestna stikalna shema

Slika 5.13
 Poenostavljena nadomestna shema ničnega sistema paralelno vezanega

Opomba: iz prevoda knjige R. Roeper-ja, Kratkostični tokovi v trifaznih omrežjih so povzeta določena poglavja. Zato poglavja ponekod ne sovpadajo z označevanjem enačb.



- a) Obratovalni element
b) Nadomestna stikalna shema

Slika 5.14

Poenostavljena nadomestna shema ničnega sistema dvojnega voda, paralelno vezanega na začetku voda s kratkostičnim mestom na prostem koncu enega voda.

3.4 Možnosti napajanja kratkostičnega mesta

Pogosto računamo kratkostične tokove za kratkostična mesta, ki so napajana iz več kratkostičnih tokovnih izvorov. Tokovi tečejo preko ločenih ali zazankanih prenosnih poti. Za različne oblike omrežij (slika 5.15), so podane enačbe za izračun kratkostične impedance omrežja \underline{Z}_k .

Pri enostransko napujanem kratkem stiku (Slika 5.15a) je kratkostična impedanca \underline{Z}_k enaka vsoti impedanc posameznih obratovalnih elementov

Pri večkratno napujanem kratkem stiku z ločenimi tokovnimi potmi (slika 5.15b), lahko kratkostične tokove v vejah A in B računamo z impedancama \underline{Z}_A in \underline{Z}_B . Rezultirajočo impedanco \underline{Z}_k dobimo na osnovi paralelne vezave impedanc \underline{Z}_A in \underline{Z}_B . Tako je možen neposreden izračun kratkostičnega toka.

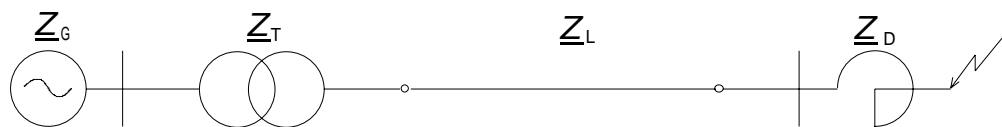
Pri večkratno napujanem kratkem stiku preko delno skupne tokovne poti (slika 5.15c), je možno izračunati paralelno impedanco \underline{Z}_{AB} do točke C ter k tej prišteti impedanco \underline{Z}_D , preko katere teče skupni kratkostični tok.

Pri večkratno napujanem kratkem stiku preko zazankanih tokovnih poti (slika 5.15d), izvajamo transfiguracijo omrežja. Odgovarjajoče nadomestne sheme so dane na slikah 5.15d do 5.15f. Na sliki 5.15e je prikazana pretvorba iz trikota v zvezdo. Nadaljne združevanje poteka, kot na sliki 5.15c.

Na sliki 5.16 je prikazan primer postopnega pretvarjanja zazankanega omrežja.

Enostransko napajani kratki stik

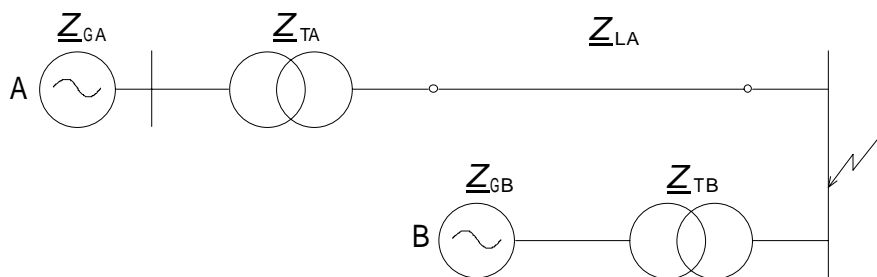
a)



$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_G + \underline{Z}_T + \underline{Z}_L + \underline{Z}_D$$

Večkratno napajani kratki stik preko ločenih tokovnih poti

b)

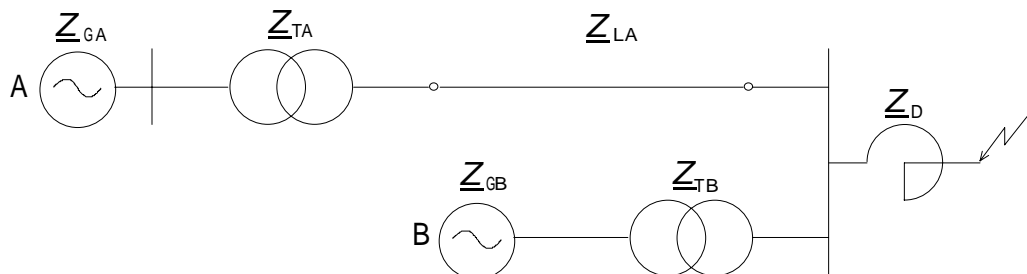


$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_{GA} + \underline{Z}_{TA} + \underline{Z}_{LA} \quad ; \quad \underline{Z}_B = \underline{Z}_{GB} + \underline{Z}_{TB}$$

$$\underline{Z}_k = \frac{\underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_B}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B}$$

Večkratno napajani kratki stik preko delno skupnih tokovnih poti

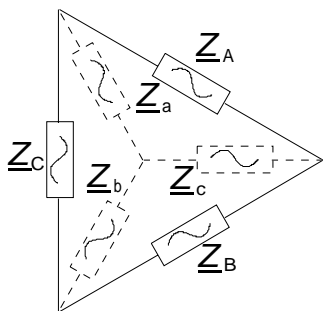
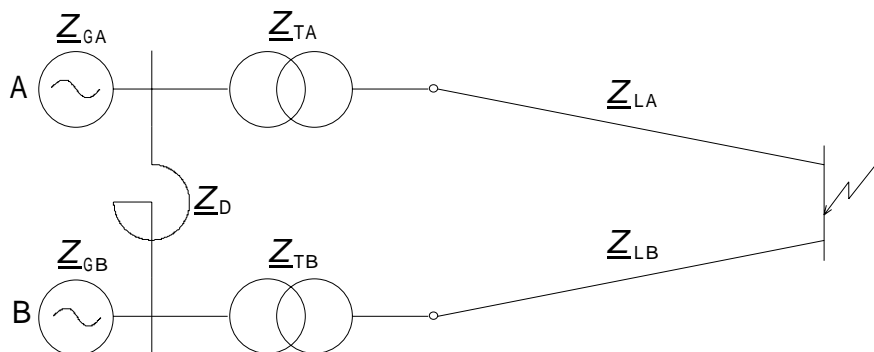
c)



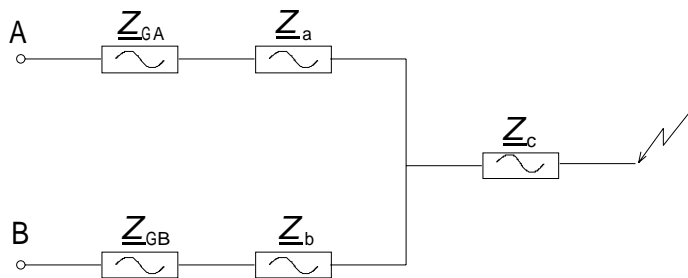
$$\underline{Z}_k = \frac{\underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_B}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B} + \underline{Z}_D$$

Večkratno napajani kratki stik preko zazankanih tokovnih poti

d)



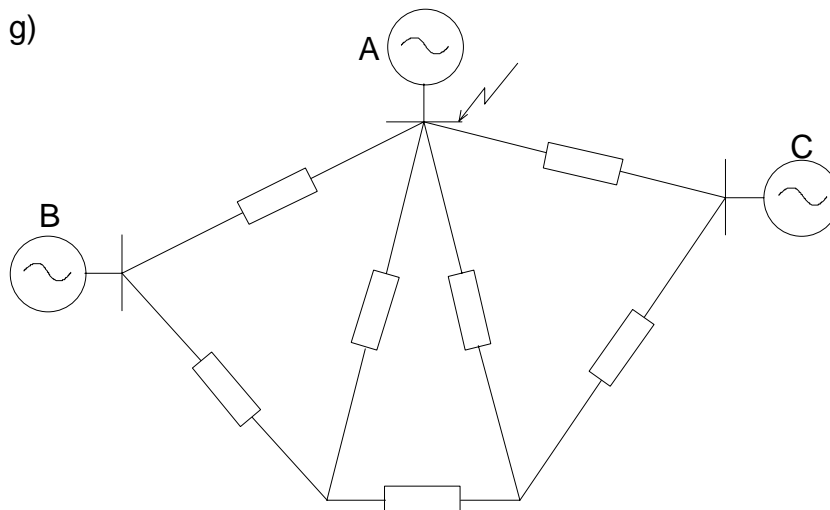
$$\begin{aligned} \underline{Z}_A &= \underline{Z}_{TA} + \underline{Z}_{LA} \\ \underline{Z}_B &= \underline{Z}_{TB} + \underline{Z}_{LB} \\ \underline{Z}_C &= \underline{Z}_D \end{aligned}$$



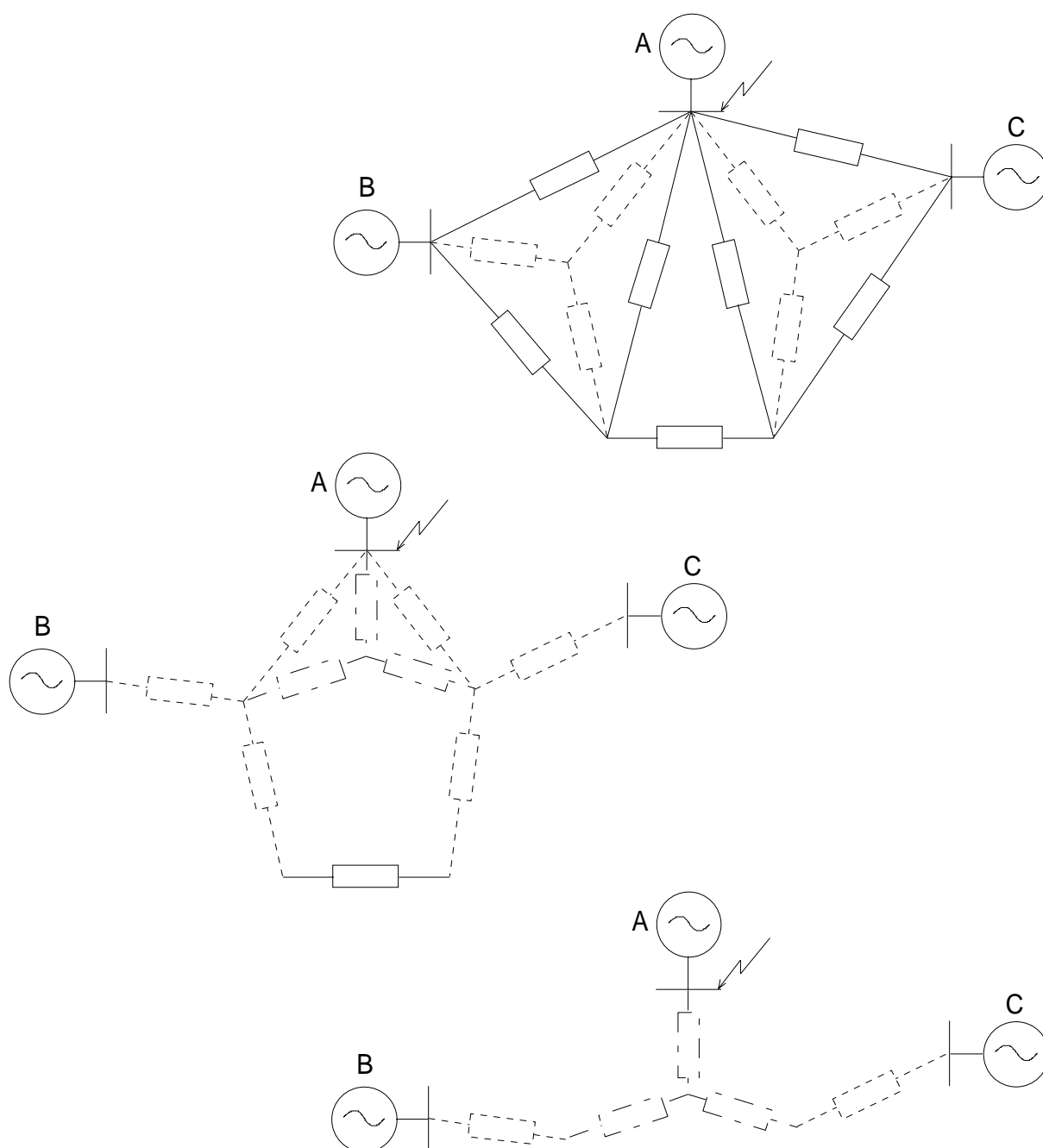
$$\begin{aligned} \underline{Z}_a &= \frac{\underline{Z}_C \cdot \underline{Z}_A}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C} ; \underline{Z}_b = \frac{\underline{Z}_B \cdot \underline{Z}_C}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C} \\ \underline{Z}_c &= \frac{\underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_B}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C} \end{aligned}$$

e) Pretvorba zvezda-trikot

f) Nadomestna stikalna shema



Slika 5.15 Primeri napajanja kratkostičnega mesta



Slika 5.16

Postopno pretvarjanje zazankanega omrežja g) na sliki 5.15 v žarkasto omrežje

Omrežje z različnimi napetostnimi nivoji

Izračun kratkostičnih tokov je najpogostejši v primerih sistemov omrežja, z različnimi napetostnimi nivoji. Povezave teh napetostnih nivojev so izvedene preko transformatorjev.

TOKOVNE OBREMENTIVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

Kot je bilo omenjeno v poglavju 5.1, bodo impedančne vrednosti n.pr. za prostoizračne in kabske vode izražene, kot absolutne vrednosti v ohm/fazo (za določeno obratovalno napetost). Za primer generatorjev in transformatorjev bodo impedančne vrednosti podane v %

(upoštevana nazivna napetost in nazivna moč). Smiselno je, da celotni sistem preračunamo na enotni napetostni nivo. Določitev kratkostične impedance omrežja lahko izvedemo po dveh postopkih.

Pri postopku, "računanje z absolutnimi vrednostmi", bodo impedance posameznih obratovalnih elementov (absolutne vrednosti), preračunane oziroma reducirane na osnovno ali bazno napetost U_B .

Pri postopku, "izračun z brezdimenzijskimi vrednostmi impedanc", bodo zato, ker je en del impedanc obratovalnih elementov brezdimenzijski, preračunane tudi impedance kratkostične poti na reducirano brezdimenzijsko vrednost. Pri tem moramo poleg bazne napetosti U_B vključiti še bazno moč S_B .

Pri sistemih omrežij z različnimi napetostnimi nivoji, lahko nazivna prestavna razmerja transformatorjev odstopajo več ali manj od nazivnih vrednosti obratovalnih napetosti. Za natančen izračun kratkostičnih tokov je zato potrebno upoštevati prestavno razmerje transformatorjev.

3.5 Izračun z absolutnimi impedančnimi vrednostmi

Absolutne impedančne vrednosti se spreminjajo s kvadratom napetosti. Z bazno napetostjo U_B , dobimo absolutno bazno impedanco, kot sledi:

Za prostoizračne vode in kable

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_N \cdot \frac{U_B^2}{U_N^2} \quad (5.13)$$

in za generatorje, transformatorje, motorje in dušilke

$$\underline{Z}_B = \underline{z}_N \cdot \frac{U_B^2}{S_N} \quad (5.14)$$

Za bazno napetost je lahko izbrana poljubna vrednost. Primerno je, da izberemo tisto bazno napetost, ki vlada ne mestu kratkega stika ob normalnih obratovalnih pogojih.

Začetno kratkostično izmenično moč in začetni kratkostični izmenični tok dobimo iz enačb

$$S_k'' = c \cdot \frac{U_B^2}{\underline{Z}_B} \quad \text{in} \quad I_{k3}'' = \frac{S_k''}{\sqrt{3} U_N}$$

kjer je U_N napetost na kratkostičnem mestu.

3.5.1 Izračun z brezdimenzijskimi impedančnimi vrednostmi

Ker so nazivne moči posameznih obratovalnih elementov različne oziroma (n.pr. za prostozračne vode), je potrebno uvesti bazno moč S_B . Za relativno impedančno vrednost \underline{Z}_B dobimo naslednje relacije:

Za prostozračne vode in kable

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_N \cdot \frac{S_B}{U_N^2} \quad (5.15)$$

in za generatorje, transformatorje, motorje in dušilke

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_N \cdot \frac{S_B}{S_N} \quad (5.16)$$

Pri tem postopku lahko za bazno moč izberemo katerokoli vrednost. Primerno je, da izberemo moč največjega generatorja ali transformatorja, ali vrednost, ki izračun poenostavi, kot n.pr. 100 ali 1000 MVA.

Začetno kratkostično izmenično moč in začetni kratkostični izmenični tok dobimo iz enačb

$$S_k'' = c \cdot \frac{S_B}{\underline{Z}_B} \quad \text{in} \quad I_k'' = \frac{S_k''}{\sqrt{3} U_N}$$

kjer je U_N nazivna napetost na kratkostičnem mestu.

3.5.2 Upoštevanje prestavnega razmerja transformatorjev

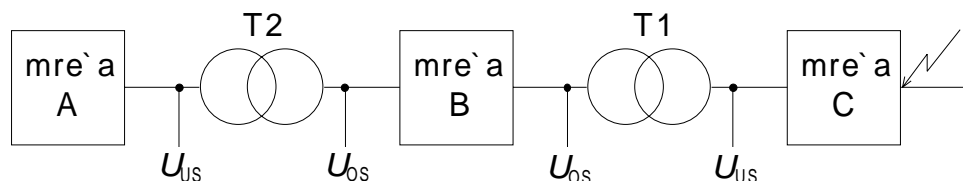
Ko prikazuje slika 5.17, so različni nivoji omrežja povezani preko transformatorjev s prestavnim razmerjem n_x . (prestavno razmerje opazujemo od kratkostičnega mesta do določene impedance). Za pretvorbo posameznih impedanc nekega nivoja omrežja x, na bazni nivo, veljajo naslednje zveze:

absolutne impedance za prostozračne vode in kable

$$\underline{Z}_{Bx} = \underline{Z}_N \cdot (n_1 \cdot n_2 \cdot \dots)^2 \quad (5.17)$$

in za generatorje, transformatorje, motorje in dušilke

$$\underline{Z}_{Bx} = \underline{Z}_N \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \cdot (n_1 \cdot n_2 \cdot \dots)^2 \quad (5.18)$$



$$n_2 = \frac{U_{OS}}{U_{US}} \qquad n_1 = \frac{U_{US}}{U_{OS}}$$

$n_1 \dots n_x$ prestavno razmerje praznega teka transformatorjev
 $U_1 \dots U_N$ napetost praznega teka transformatorjev

Slika 5.17 Omrežje z večjim številom napetostnih nivojev

Brezdimenzijske impedance za prostoizračne vode in kable

$$z_{Bx} = z_N \cdot \frac{S_B}{U_b^2} \cdot (n_1 \cdot n_2 \dots)^2 \qquad (5.19)$$

in za generatorje, transformatorje, motorje in dušilke

$$z_{Bx} = z_N \cdot \frac{S_B}{S_N} \cdot \frac{U_N^2}{U_B^2} \cdot (n_1 \cdot n_2 \dots)^2 \qquad (5.20)$$

Za izračun začetne kratkostične izmenične moči in toka veljajo relacije v poglavju v prejšnjih poglavjih

3.6 Tripolni kratki stik –poenostavljena metoda

Pri postopku dimenzioniranja elektroenergetskih postrojev, naprav in aparatov je potrebno poznati tokove, ki obremenjujejo naprave pri kratkih stikih. Najpogosteje velja, da so tripolni kratkostični tokovi najbolj neugodni, oziroma največji. Pri tem nastopa simetrična obremenitev vseh trifaznih vodnikov. Velikokrat se lahko zadovoljimo z nenatančnimi izračuni. Iz tega razloga se često posega po metodah, ki so enostavne in hitro izračunljive. Značilnost poenostavljene metode je, da so izračunane vrednosti kratkostičnih tokov za okoli 10% večje. To iz razloga, ker se ohmske upornosti impedanc ne upoštevajo. Upošteva se le reaktanca določenega elektroenergetskega elementa.

Poenostavljena metoda govori o padcih napetosti, ki se pojavljajo pri različnih tokovih v posameznih delih tokokrogov.

Pri nazivnem toku, ki se zaključuje preko določenega elektroenergetskega elementa je procentualni padec napetosti enak:

$$u = \frac{\sqrt{3}I_u Z}{U_n} 100 \text{ (\%)}$$

medtem ko pri poljubni tokovni obremenitvi :

$$u_x = \frac{\sqrt{3}I_x Z}{U_n} 100 \text{ (\%)}$$

Zato velja razmerje:

$$\frac{u_x}{u} = \frac{I_x}{I_n} = \frac{S_x}{S_n}$$

V enačbo vstavimo vrednost za moč $S_x = 1$ MVA in primerjamo padec napetosti, ki ga povzroči moč 1 MVA s procentualnim padcem napetosti pri nazivni moči. Iz primerjave dobimo, da je takoimenovani procentualni padec napetosti, ki ga označimo z » u' » enak:

$$u' = \frac{u}{S_n} \text{ (\%)}$$

Na ta način je možno zapisati reducirani procentualni padec napetosti za generator in transformator kar takoj:

Generator

$$u'_G = \frac{X'_{dG}}{S_{nG}} \text{ (\%)}$$

Zgornja enačba velja tudi za sinhrono motorje in asinhrono motorje

Transformator

$$u_{Tr} = \frac{u_k}{S_{nTr}} \text{ (\%)}$$

Daljnovid, vod, kablovod

$$u'_v = \frac{u_{DV}}{S_{nDV}} = \frac{\sqrt{3}I_n Z_{DV}}{U_n S_{nDV}} 100$$

Enačbo za vod modificiramo tako, da jo pomnožimo z $\frac{U_n}{U_n}$ in dobimo:

$$u'_v = \frac{u_v}{S_{nV}} = Z_v \frac{100}{U_n^2} (\%)$$

Kratkostično dušilka

Pri kratkostični dušilki se podatki nanašajo lahko na takoimenovano redno napetost U_D , za katero je dušilka zgrajena in tudi vgrajena v okolje te napetosti, in na obratovalno napetost $U_{D,o}$, kjer se napetost omrežja razlikuje od redne napetosti dušilke. Iz tega razloga se procentualni padci napetosti razlikujejo kot sledi:

$$u_D = \frac{\sqrt{3}I_n Z_D}{U_D} 100 (\%) \qquad u_{D,o} = \frac{\sqrt{3}I_n Z_D}{U_{D,o}} 100 (\%)$$

Iz zgornjega zapisa lahko zaključimo, da je $u_{D,o} = u_D \frac{U_D}{U_{D,o}}$

Za moč dušilke velja:

$$S_D = \sqrt{3}I_n U_D \quad \text{ali} \quad S_{D,o} = \sqrt{3}I_n U_{D,o}$$

$$\frac{S_D}{S_{D,o}} = \frac{U_D}{U_{D,o}} \rightarrow S_{D,o} = S_D \frac{U_{D,o}}{U_D}$$

Na osnovi predhodnih trditev preidimo na izračun reduciranega procentualnega padca napetosti:

$$u'_{D,o} = \frac{u_{D,o}}{S_{D,o}} = \frac{u_D}{S_{D,o}} \frac{U_D}{U_{D,o}} = \frac{u_D}{S_D} \left(\frac{U_D}{U_{D,o}} \right)^2$$

$$u'_{D,o} = \frac{u_D}{S_D} \left(\frac{U_D}{U_{D,o}} \right)^2$$

V kolikor napetosti sovpadata $U_D = U_{D,o}$ je:

$$u'_D = \frac{u_D}{S_D}$$

Opomba: z reduciranimi procentualnimi padci napetosti posameznih elektroenergetskih elementov izvajamo v postopku transfiguracije električnega omrežja in v nadaljnjem izračunu enake postopke, kot pri uporabi impedančnih vrednosti omenjenih elektroenergetskih elementov. To velja izključno za izračun veličin pri tripolnem kratkem stiku.

4. IZRAČUN POSAMEZNIH VRST KRATKIH STIKOV S SIMETRIČNIMI KOMPONENTAMI

Stikalna shema na sliki 4.1, ki jo sestavljajo generator G, transformator T in vod L, naj predstavlja osnovo za nadaljno obravnavo.

Vod je na koncu odprt, torej brez obtežbe. Zaradi tega veljajo izpeljane relacije na splošno tudi tedaj, kadar je vod napaján iz dveh ali več izvorov.

V nadomestni shemi pomenijo:

- \underline{Z}_G kratkostična impedanca generatorja,
- \underline{Z}_T kratkostična impedanca transformatorja,
- \underline{Z}_L impedanca voda,
- \underline{Z}_C impedanca dozemne kapacitivnosti voda,
- \underline{Z}_E impedanca zvezdiščne točke transformatorja.*

Trije vodi oziroma faze imajo skupno impedanco zemlje \underline{Z}_E . Zaradi tega je v nadomestni shemi za en vodnik upoštevana trikratna vrednost. Velikosti impedanc v nadomestni shemi, so odvisne od prenosnih zmognosti omrežja, medtem ko je impedanca zemlje \underline{Z}_E odvisna od

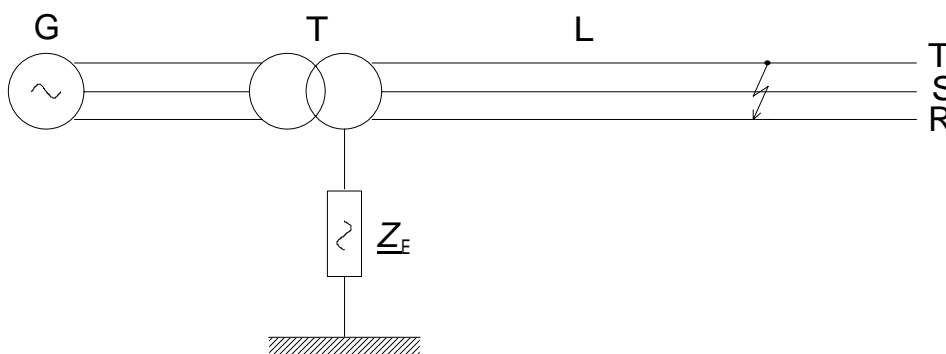
ozemljitve nevtralne točke (zvezdišča) omrežja. Vrednost $\underline{Z}_E = \infty$ odgovarja omrežju z izoliranim zvezdiščem, medtem ko $\underline{Z}_E = 0$ odgovarja omrežju z direktno ozemljitvijo.

Trifazni sinhronski generatorji vzpostavljajo v trifaznem omrežju napetost, katere začetna vrednost bo simetrična v treh fazah in neodvisna od obremenitve. Imela bo isto smer vrtenja, kot sofazni sistem. Zaradi tega bo generatorska napetost pri simetričnih in nesimetričnih kratkih stikih izražena le v sofaznem sistemu. V protifaznem in ničnem sistemu napetost ne obstaja.

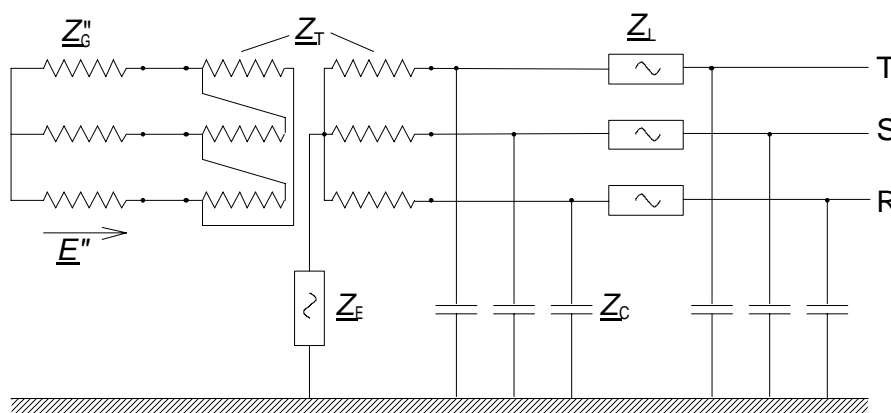
Torej velja:

$$\underline{E}_1'' = \underline{E}'', \quad \underline{E}_2'' = 0, \quad \underline{E}_0'' = 0 \quad . \quad (4.1)$$

Pri simetričnem in tudi nesimetričnem kratkem stiku bo upoštevan vodnik R, kot osnovni vodnik zato, ker je tako lahko dan odnos do ostalih dveh vodnikov.



a) Stikalna shema omrežja



b) Nadomestna stikalna shema

Slika 4.1 Aktivne impedance omrežja pri kratkem stiku

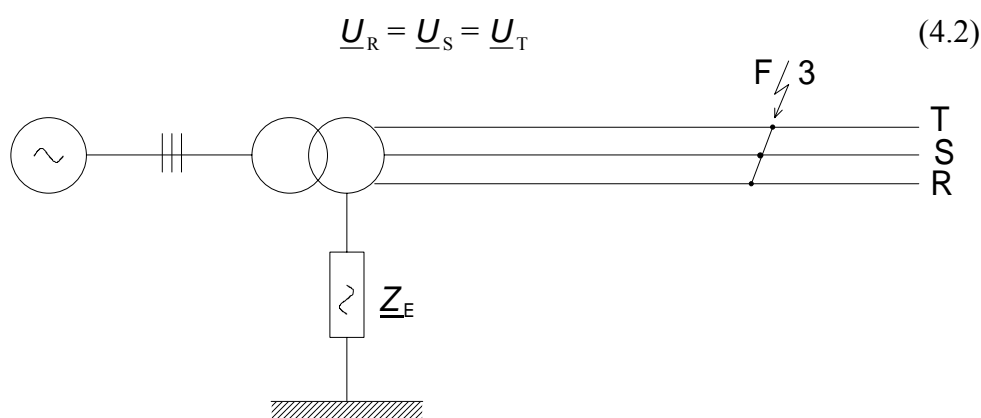
V nadaljevanju bodo za posamezne kratkostične primere izpeljane enačbe za izračun kratkostičnih tokov z upoštevanjem napetosti prisotnih generatorjev in tujih virov.

Pri nadomestnih shemah za simetrične komponentne sisteme v osnovi ne bo upoštevana invarianca moči zato, ker ni pomembna pri izračunu napetosti in tokov.

V predstavljenih kazalčnih diagramih ne bo upoštevana fazna premaknitev med napetostmi in tokovi, ker bodo prikazani le osnovni odnosi veličin vsakokratnih sistemov.

4.1 Tripolni kratki stiki

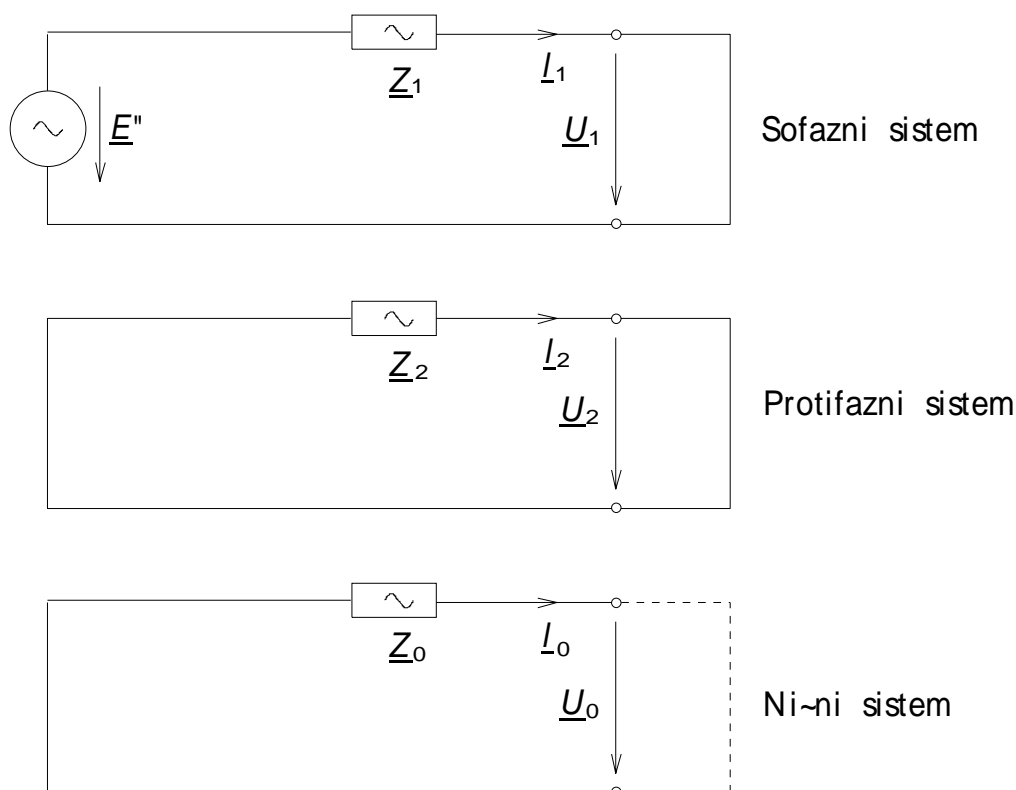
Tripolni kratki stiki na sliki 4.2 predstavljajo za omrežje simetrično obremenitev. Napetost treh vodnikov na mestu kratkega stika je nič. Tako je



Slika 4.2 Stikalna shema omrežja s tripolnim kratkim stikom

Iz teorije simetričnih komponent dobimo, ob upoštevanju, da je vodnik R osnovni vodnik, za tokove omrežja in komponentne tokove oziroma napetosti naslednje odnose

$$\underline{U}_1 = 0; \quad \underline{U}_2 = 0; \quad \underline{U}_0 = 0. \quad (4.3)$$



Slika 4.3 Nadomestna stikalna shema simetričnih komponent omrežja za tripolni kratki stik

Slika 4.3 prikazuje nadomestno stikalno shemo komponent omrežja z začetno generatorsko napetostjo \underline{E}'' . Na osnovi prej omenjenih pogojev (4.3) veljajo naslednje enačbe:

$$\text{sofazni sistem:} \quad \underline{U}_1 = \underline{E}'' - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = 0; \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_1}, \quad (4.4)$$

$$\text{protifazni sistem} \quad \underline{U}_2 = -\underline{I}_2 \underline{Z}_2 = 0; \quad \underline{I}_2 = 0, \quad (4.5)$$

$$\text{nični sistem} \quad \underline{U}_0 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_0 = 0; \quad \underline{I}_0 = 0. \quad (4.6)$$

Predstavljeni odnosi v enačbah (3.3a) izraženi s faznimi tokovi dajo:

$$\underline{I}_R = \underline{I}_1; \quad \underline{I}_S = \underline{a}^2 \underline{I}_1; \quad \underline{I}_T = \underline{a} \underline{I}_1, \quad (4.7)$$

tako velja

$$\underline{I}_R = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{I}_S = \underline{a}^2 \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{I}_T = \underline{a} \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_1}. \quad (4.8)$$

Ker so trije fazni tokovi po iznosu enako veliki, bo začetni kratkostični izmenični tok

$$\underline{I}_{k3}'' = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_1} . \quad (4.9)$$

Protifazni in nični sistem ne nastopata, ker gre za primer simetričnega kratkega stika. Zaradi tega je:

$$\underline{I}_{1R} = \underline{I}_1 = \underline{I}_R ; \quad \underline{I}_{1S} = \underline{a}^2 \underline{I}_1 = \underline{I}_S ; \quad \underline{I}_{1T} = \underline{a} \underline{I}_1 = \underline{I}_T \quad (4.10)$$

in

$$\underline{U}_{1R} = \underline{U}_1 = \underline{U}_R = 0 ; \quad \underline{U}_{1S} = \underline{a}^2 \underline{U}_1 = \underline{U}_S = 0 ; \quad \underline{U}_{1T} = \underline{a} \underline{U}_1 = \underline{U}_T = 0 . \quad (4.11)$$

4.2 Dvopolni kratki stik brez dotika z zemljo

Dvopolni kratki stik brez dotika z zemljo predstavlja za omrežje nesimetrično obremenitev (slika 4.4). Velja:

$$\underline{U}_S = \underline{U}_T ; \quad \underline{I}_R = 0 ; \quad \underline{I}_S = - \underline{I}_T . \quad (4.12)$$

Za tokove omrežja in komponente tokove oziroma napetosti, ob upoštevanju, da je vodnik R osnovni vodnik, dobimo naslednje enačbe:

$$\underline{U}_S - \underline{U}_T = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 ; \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_2 ; \quad (4.13)$$

$$3\underline{I}_0 = \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = 0 ; \quad \underline{I}_0 = 0 ; \quad (4.14)$$

$$\underline{I}_R = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 ; \quad \underline{I}_1 = -\underline{I}_2 ; \quad (4.15)$$

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0} ; \quad \underline{U}_0 = 0 . \quad (4.16)$$

In za tokove \underline{I}_S in \underline{I}_T

$$\underline{I}_{1S} = \underline{a}^2 \underline{I}_1 + \underline{a} \underline{I}_2 ; \quad \underline{I}_S = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{I}_1 ; \quad (4.17)$$

$$\underline{I}_{1T} = \underline{a} \underline{I}_1 + \underline{a}^2 \underline{I}_2 ; \quad \underline{I}_T = (\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{I}_1 . \quad (4.18)$$

Slika 4.5a prikazuje nadomestno stikalno shemo za komponente omrežja z generatorsko začetno napetostjo \underline{E}'' .

Veljajo naslednje zveze:

$$\text{sofazni sistem:} \quad \underline{U}_1 = \underline{E}'' - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 , \quad (4.19)$$

$$\text{protifazni sistem} \quad \underline{U}_2 = - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 , \quad (4.20)$$

$$\text{nični sistem} \quad \underline{U}_0 = - \underline{I}_0 \underline{Z}_0 . \quad (4.21)$$

Ker je $\underline{U}_1 = \underline{U}_2$ (4.13) in $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2$, (4.15) sledi

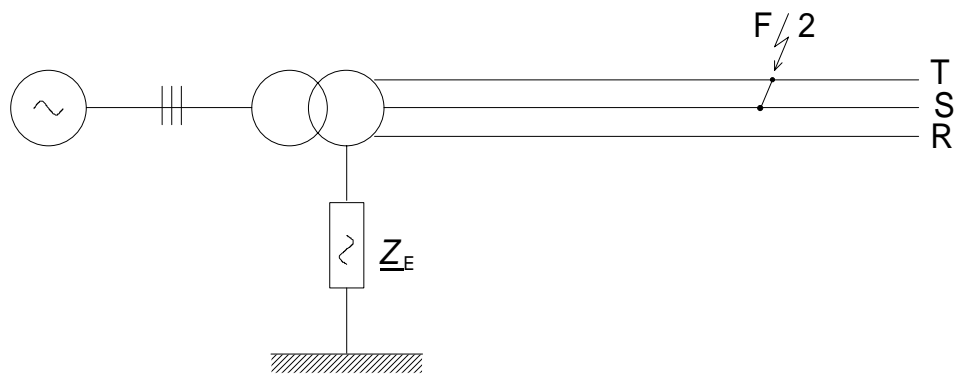
$$\underline{E}'' = \underline{I}_1 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) \quad \text{in} \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (4.22)$$

Če vstavimo izraz za \underline{I}_1 (4.22) v enačbi za \underline{I}_S (4.17) in \underline{I}_T (4.18) dobimo

$$\underline{I}_S = \frac{(\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{E}''}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = -\frac{j\sqrt{3} \underline{E}''}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad (4.23)$$

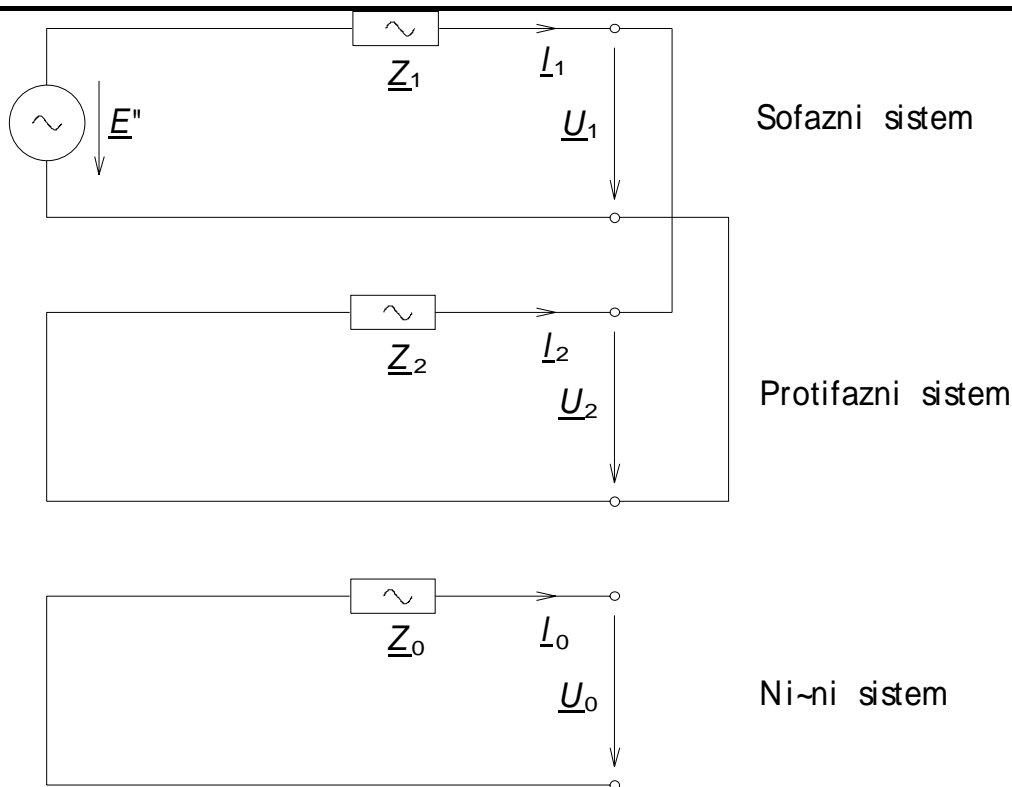
in

$$\underline{I}_T = \frac{(\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{E}''}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{j\sqrt{3} \underline{E}''}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (4.24)$$



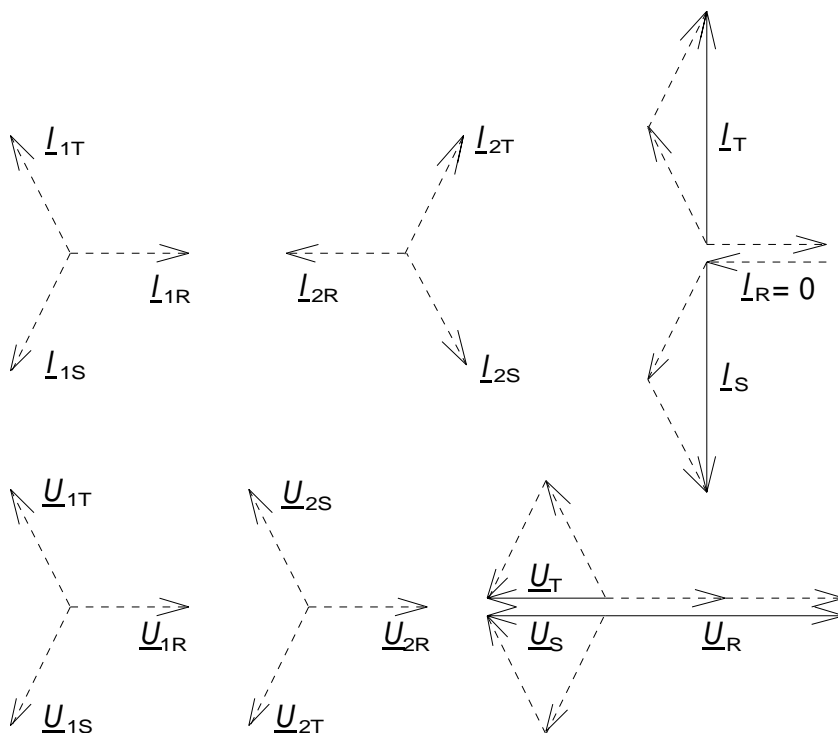
Slika 4.4

Stikalna shema omrežja z dvopolnim kratkim stikom brez dotika z zemljo



Slika 4.5a

Nadomestna stikalna shema simetričnih komponent omrežja za dvopolni kratki stik brez dotika z zemljo



Slika 4.5b

Tokovne in napetostne komponente pri dvopolnem kratkem stiku brez dotika z zemljo

Oba toka sta po iznosu enako velika. Tako dobimo za dvopolni začetni kratkostični izmenični tok brez dotika z zemljo naslednjo zvezo:

Opomba: iz prevoda knjige R. Roepert-ja, *Kratkostični tokovi v trifaznih omrežjih* so povzeta določena poglavja. Zato poglavja ponekod ne sovpadajo z označevanjem enačb.

$$\underline{I}_{k2}'' = \frac{\sqrt{3} \underline{E}''}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \quad (4.25)$$

Za najpogosteje nastopajoči primer, da je $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ velja

$$\underline{I}_{k2}'' = \frac{\sqrt{3} \underline{E}''}{2\underline{Z}_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{I}_{k3}'' \quad (4.26)$$

Za napetost $\underline{U}_R = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0$ zdravega vodnika dobimo, da je $\underline{U}_0 = 0$ (4.16) in tako

$$\underline{U}_R = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 \quad (4.27)$$

Če se vstavijo ustrezne vrednosti za \underline{U}_1 (4.19) in \underline{U}_2 (4.13) dobimo:

$$\underline{U}_R = \underline{E}'' \frac{2\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \quad (4.27)$$

V primeru, da je $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$, bo $\underline{U}_R = \underline{E}''$.

Slika 4.5b prikazuje kazalčne diagrame odgovarjajočih sofaznih in protifaznih sistemov in rezultirajoče komponente.

Impedanca ozemljitve \underline{Z}_E zaradi $\underline{U}_0 = 0$ v času kratkostičnega pojava ni prisotna.

4.3 Dvopolni kratki stik z dotikom z zemljo

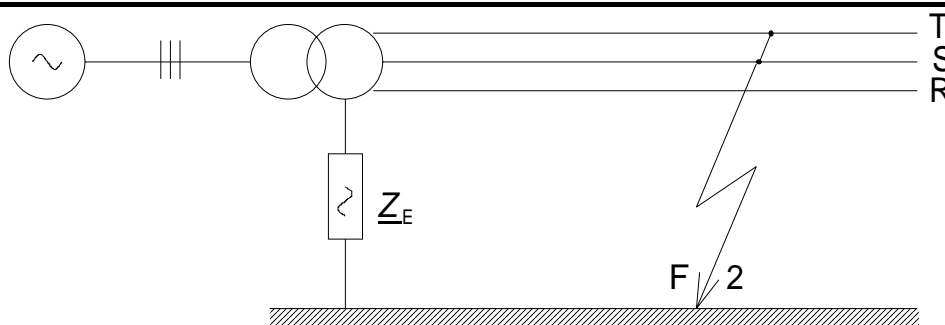
Za dvopolni kratki stik z dotikom z zemljo velja po sliki 4.6

$$\underline{U}_S = \underline{U}_T = 0; \quad \underline{I}_R = 0. \quad (4.28)$$

Za osnovni vodnik velja:

$$\underline{I}_R = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0; \quad \underline{I}_1 = -\underline{I}_2 - \underline{I}_0 \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} 3\underline{U}_1 &= \underline{U}_R + \underline{a} \underline{U}_S + \underline{a}^2 \underline{U}_T = \underline{U}_R; \\ 3\underline{U}_2 &= \underline{U}_R + \underline{a}^2 \underline{U}_S + \underline{a} \underline{U}_T = \underline{U}_R; \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \underline{U}_0. \\ 3\underline{U}_0 &= \underline{U}_R + \underline{U}_S + \underline{U}_T = \underline{U}_R; \end{aligned} \quad (4.30)$$



Slika 4.6

Stikalna shema omrežja z dvopolnim kratkim stikom z dotikom z zemljo

Slika 4.7a prikazuje nadomestno stikalno shemo z začetno generatorsko napetostjo \underline{E}'' , kot aktivno napetostjo.

Veljajo naslednji odnosi.

$$\text{sofazni sistem:} \quad \underline{U}_1 = \underline{E}'' - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 \quad , \quad (4.31)$$

$$\text{protifazni sistem} \quad \underline{U}_2 = - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 \quad , \quad (4.32)$$

$$\text{nični sistem} \quad \underline{U}_0 = - \underline{I}_0 \underline{Z}_0 \quad . \quad (4.33)$$

Ker velja $\underline{I}_R = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0$ (4.29) in $\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \underline{U}_0$ (4.30) sledi

$$\underline{I}_R = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_1} - \underline{U}_1 \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 \underline{Z}_0} = 0 \quad \text{in} \quad (4.34)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{E}'' \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \underline{Z}_1} \quad . \quad (4.35)$$

Nadalje velja:

$$\underline{I}_1 = \underline{E}'' \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}{\underline{A}} ; \quad \underline{I}_2 = - \underline{E}'' \frac{\underline{Z}_0}{\underline{A}} ; \quad \text{in} \quad \underline{I}_0 = - \underline{E}'' \frac{\underline{Z}_2}{\underline{A}} ; \quad (4.36)$$

pri čemer je $\underline{A} = \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \underline{Z}_1$

Fazni tokovi \underline{I}_S in \underline{I}_T znašajo:

$$\underline{I}_{k2ES}'' = \underline{I}_S = + j\sqrt{3} \underline{E}'' \frac{a \underline{Z}_2 - \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \underline{Z}_1} \quad \text{in} \quad (4.37)$$

$$\underline{I}_{k2ET}'' = \underline{I}_T = - j\sqrt{3} \underline{E}'' \frac{a^2 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \underline{Z}_1} \quad . \quad (4.38)$$

Tok, ki se zaključuje preko zemlje I_E je torej enak vsoti I_S in I_T oziroma

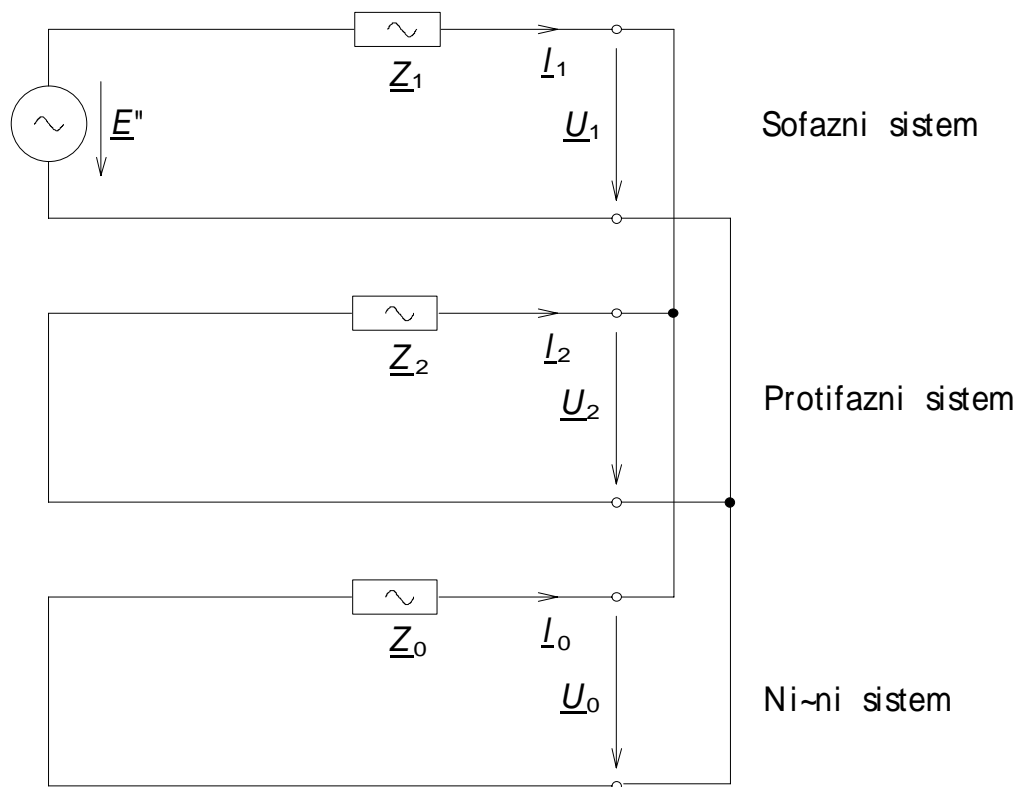
$$I_{KE2E}'' = I_S + I_T = 3E'' \frac{Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} = 3I_0. \quad (4.39)$$

V skladu z enačbama (4.30) $U_1 = U_2 = U_0$ in (3.4) $U_R = U_1 + U_2 + U_0$ velja, da je napetost zdrave faze U_R nasproti zemlji

$$U_R = 3E'' \frac{Z_2 Z_0}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1}. \quad (4.40)$$

Slika 4.7b prikazuje kazalčni diagram odgovarjajočih sofaznih, protifaznih in ničnih sistemov ter rezultirajoče komponente.

Nadaljni pregled nad začetnimi vrednostmi kratkostičnih tokov pri dvopolnem kratkem stiku z dotikom z zemljo dobimo na slikah 4.8 do 4.10. V njih je prikazan potek kratkostičnega toka, ki teče preko zemlje (za vodnike, ki so v okvari) v odvisnosti od Z_0/Z_1 in od razlike impedančnega kota $Z_1 - Z_0$.

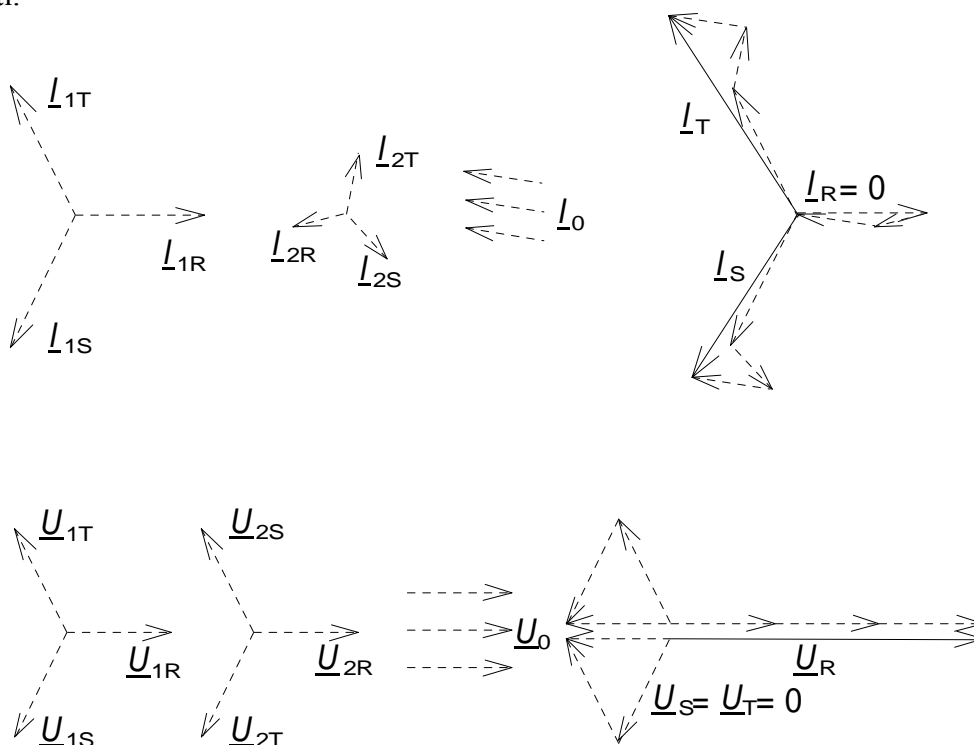


Slika 4.7a

Nadomestna stikalna shema simetričnih komponent omrežja za dvopolni kratki stik z dotikom z zemljo

TOKOVNE OBREMENTIVNE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

Za sofazno in protifazno impedanco je pri tem vzeta za osnovo največkrat prisotni odnos, da je $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$. Krivulje omogočajo tako neposredno možno primerjavo nastopajočih tokovnih vrednosti.



Slika 4.7b

Komponente toka in napetosti pri dvopolnem kratkem stiku z dotikom z zemljo

Slika 4.8 in 4.9 prikazujeta, da se velikosti začetnih kratkostičnih tokov izredno hitro spreminjata, če je razmerje Z_0/Z_1 majhno in če je razlika impedančnega kota $\underline{Z}_1 - \underline{Z}_0$ velika. Teoretični primer $\varphi_1 - \varphi_0 = 180^\circ$ vodi pri $Z_0/Z_1 = 0.5$ do ∞ vrednosti. Nasprotno pa je lahko dosežena v določenem vodniku celo vrednost nič pri $\varphi_1 - \varphi_0 = 120^\circ$ in $Z_1/Z_2 = 1$. $\varphi_1 - \varphi_0 > 90^\circ$ pomeni, da ima impedanca \underline{Z}_1 induktivni in \underline{Z}_0 kapacitivni karakter. Ta primer nastopa le v primeru z izoliranim zvezdiščem zato, ker je v ničnem sistemu prisotna kapacitivna upornost \underline{Z}_C . V sofaznem in protifaznem sistemu pa nasprotno prevladuje induktivna upornost. Za $\underline{Z}_0 \rightarrow \infty$ potekajo krivulje proti vrednosti $0.5\sqrt{3}$, torej k vrednosti, ki se pojavi pri dvopolnem kratkem stiku brez dotika z zemljo. V kolikor doseže $\varphi_1 - \varphi_0$ negativno vrednost se fazni tokovi zamenjajo. Vrednost za vodnik T velja za vodnik S in obratno.

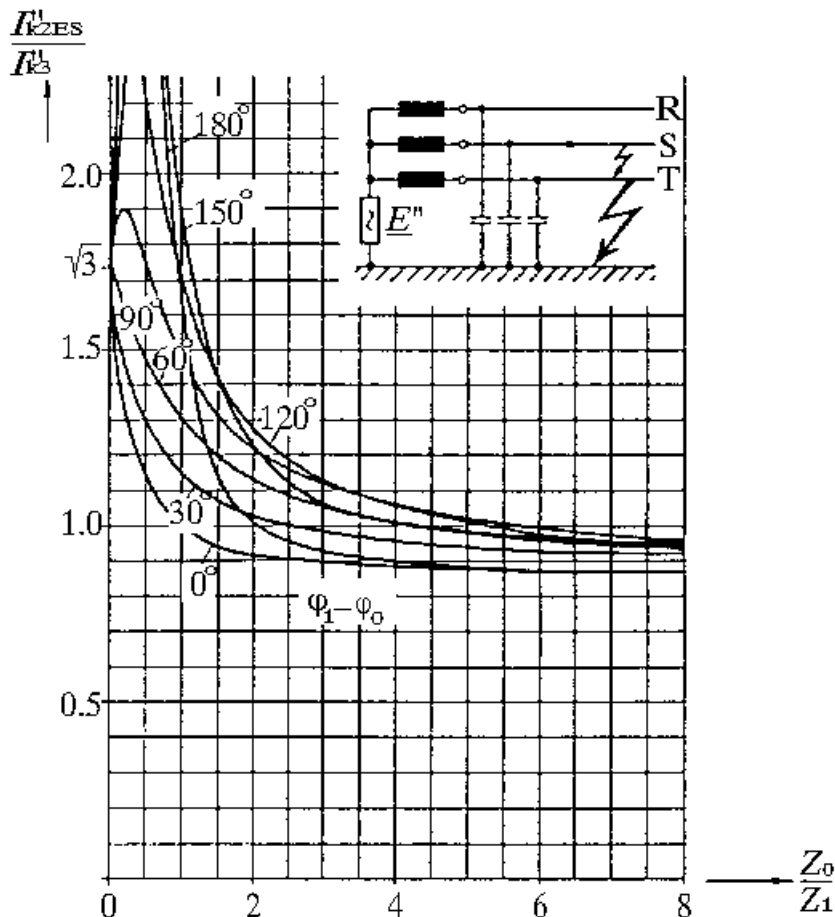
Na sliki 4.10 je predstavljena velikost začetnega kratkostičnega toka, ki teče preko zemlje. Tok narašča tem hitreje, čim manjše je razmerje Z_0/Z_1 in čim večja je razlika kotov $\varphi_1 - \varphi_0$. Predznak razlike kotov pri tem ni pomemben.

Slika 4.11 prikazuje velikosti napetosti obratovalne frekvence zdravega vodnika v odvisnosti od Z_0/Z_1 in kotne razlike $\varphi_1 - \varphi_0$. Predznak razlike kotov nima nikakršnega vpliva. Teoretično najmanjša možna vrednost za \underline{Z}_0 je nič. Za $\underline{Z}_0 \rightarrow \infty$ potekajo vse krivulje proti

TOKOVNE OBREMITVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

vrednosti $1.5 \cdot E''$. Tako torej napetost zdrave faze naraste nasproti zemlji na 86.6% medfazne napetosti $\sqrt{3} \cdot E''$ oziroma na 150% napetosti E'' .

Posebno visoka napetost nastopi, ko je $\varphi_1 - \varphi_0 > 90^\circ$. Teoretični primer $\varphi_1 - \varphi_0 = 180^\circ$ pri $Z_0/Z_1 = 0.5$ ima za posledico, da gre razmerje U_R/E'' proti ∞ .



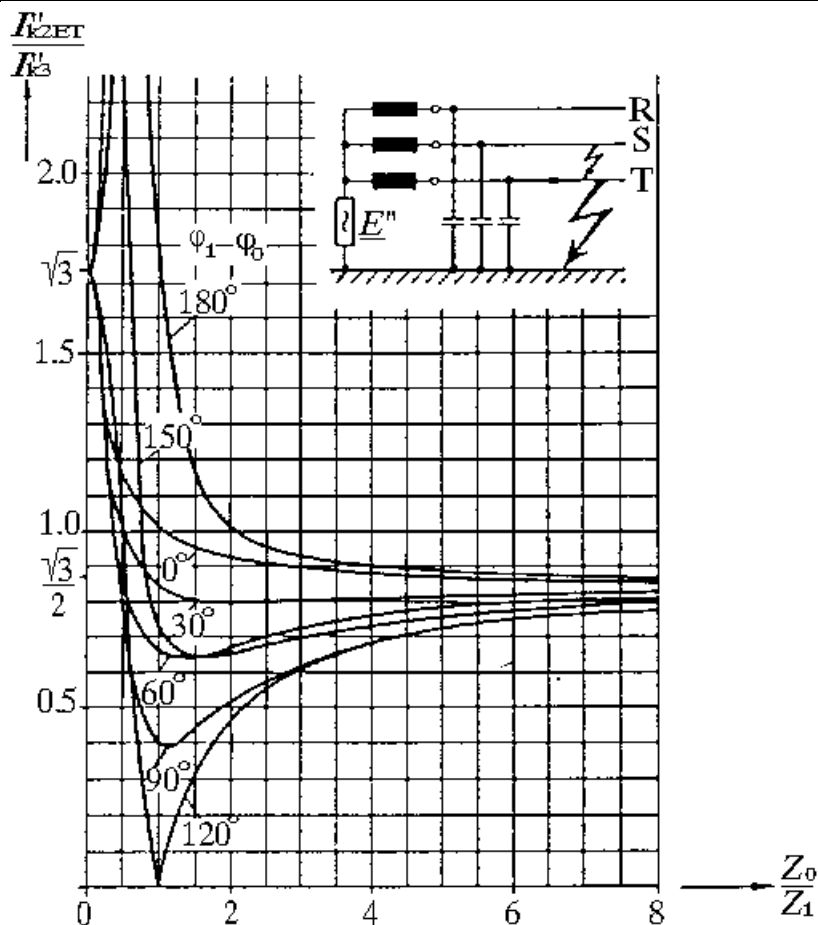
$$I_{k2ES}'' = + j\sqrt{3} E'' \frac{aZ_2 - Z_0}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_0Z_1}$$

- E'' Aktivna napetost
- Z_0 Impedanca ničnega sistema
- Z_1 Impedanca sofaznega sistema
- Z_2 Impedanca protifaznega sistema
- a^2 Operator (-0.5 - j 0.87)
- $\varphi_1 - \varphi_0$ Kotna razlika $Z_1 - Z_0$
- $Z_1 = Z_2$

Slika 4.8

Dvopolni kratkostični tok z dotikom z zemljo. Primerjava kratkostičnega toka

I_{k2ES}'' v fazi S z I_{k3}''



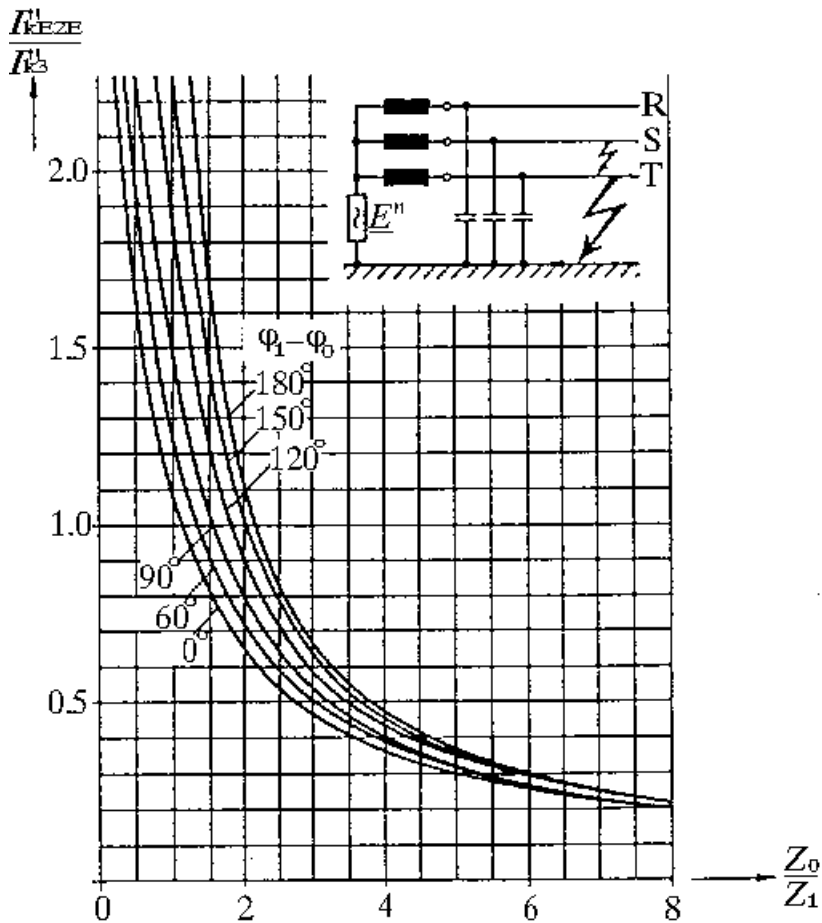
$$I'_{k2ET} = -j\sqrt{3} E'' \frac{a^2 Z_2 - Z_0}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1}$$

- E'' Aktivna napetost
- Z_0 Impedanca ničnega sistema
- Z_1 Impedanca sofaznega sistema
- Z_2 Impedanca protifaznega sistema
- a Operator $(-0.5 + j0.87)$
- $\varphi_1 - \varphi_0$ Kotna razlika $Z_1 - Z_0$
- $Z_1 = Z_2$

Slika 4.9

Dvopolni kratki stik z dotikom z zemljo. Primerjava kratkostičnega toka

I'_{k2ET} v fazi T z I'_{k3}

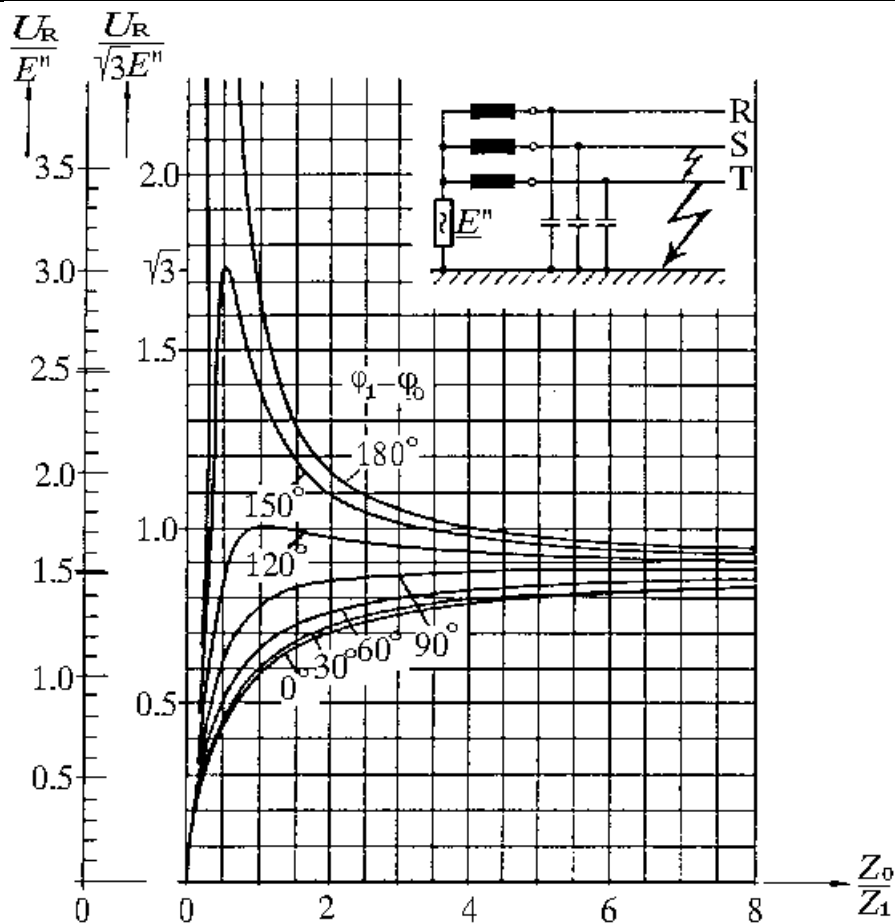


$$I_{KE2E}'' = 3 E'' \frac{Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1}$$

- E'' Aktivna napetost
- Z_0 Impedanca ničnega sistema
- Z_1 Impedanca sofaznega sistema
- Z_2 Impedanca protifaznega sistema
- $\varphi_1 - \varphi_0$ Kotna razlika $Z_1 - Z_0$
- $Z_1 = Z_2$

Slika 4.10

Dvopolni kratki stik z dotikom z zemljo. Primerjava kratkostičnega toka I_{KE2E}'' , ki se zaključuje preko zemlje, z I_{k3}''



$$\underline{U}_R = 3 \underline{E}'' \frac{\underline{Z}_0 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \underline{Z}_1}$$

- \underline{E}'' Aktivna napetost
- \underline{Z}_0 Impedanca ničnega sistema
- \underline{Z}_1 Impedanca sofaznega sistema
- \underline{Z}_2 Impedanca protifaznega sistema
- $\varphi_1 - \varphi_0$ Kotna razlika $\underline{Z}_1 - \underline{Z}_0$
- $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$

Slika 4.11

Dvopolni kratki stik z dotikom z zemljo. Primerjava napetosti U_R , obratovalne frekvence zdravega vodnika R nasproti zemlji, s $\sqrt{3} \cdot E''$ ali E''

4.4 Enopolni zemeljski stik

Za enopolni zemeljski stik na sliki 4.12 veljajo pogoji

$$\underline{U}_R = 0; \quad \underline{I}_S = 0; \quad \underline{I}_T = 0. \quad (4.41)$$

Tako dobimo iz enačb (3.3) in (3.4) naslednje enačbe ob pogoju, da je vodnik R upoštevan kot osnovni vodnik.

$$\begin{aligned} 3\underline{I}_1 &= \underline{I}_R + \underline{a} \underline{I}_S + \underline{a}^2 \underline{I}_T = \underline{I}_R; \\ 3\underline{I}_2 &= \underline{I}_R + \underline{a}^2 \underline{I}_S + \underline{a} \underline{I}_T = \underline{I}_R; \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0. \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} 3\underline{I}_0 &= \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = \underline{I}_R; \\ \underline{U}_R &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0; \quad \underline{U}_1 = -\underline{U}_2 - \underline{U}_0. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Slika 4.13a prikazuje nadomestno shemo komponent omrežja z generatorsko začetno napetostjo E'' .

Veljajo naslednji odnosi:

$$\text{sofazni sistem:} \quad \underline{U}_1 = \underline{E}'' - \underline{I}_1 \underline{Z}_1, \quad (4.44)$$

$$\text{protifazni sistem} \quad \underline{U}_2 = -\underline{I}_2 \underline{Z}_2, \quad (4.45)$$

$$\text{nični sistem} \quad \underline{U}_0 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_0. \quad (4.46)$$

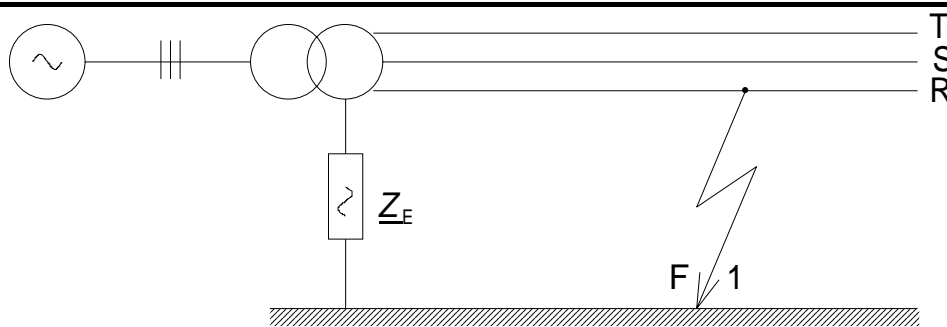
Ker je po enačbi (4.42) $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0$ in po enačbi (4.43) $\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0$ velja

$$\underline{U}_R = \underline{E}'' - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 - \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = 0, \quad (4.47)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}. \quad (4.48)$$

Iz enačb (4.42) dobimo $\underline{I}_R = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 3\underline{I}_1$ in s tem za začetni kratkostični tok $\underline{I}_{k1}'' = \underline{I}_R$ naslednjo zvezo

$$\underline{I}_{k1}'' = \frac{3\underline{E}''}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}. \quad (4.49)$$

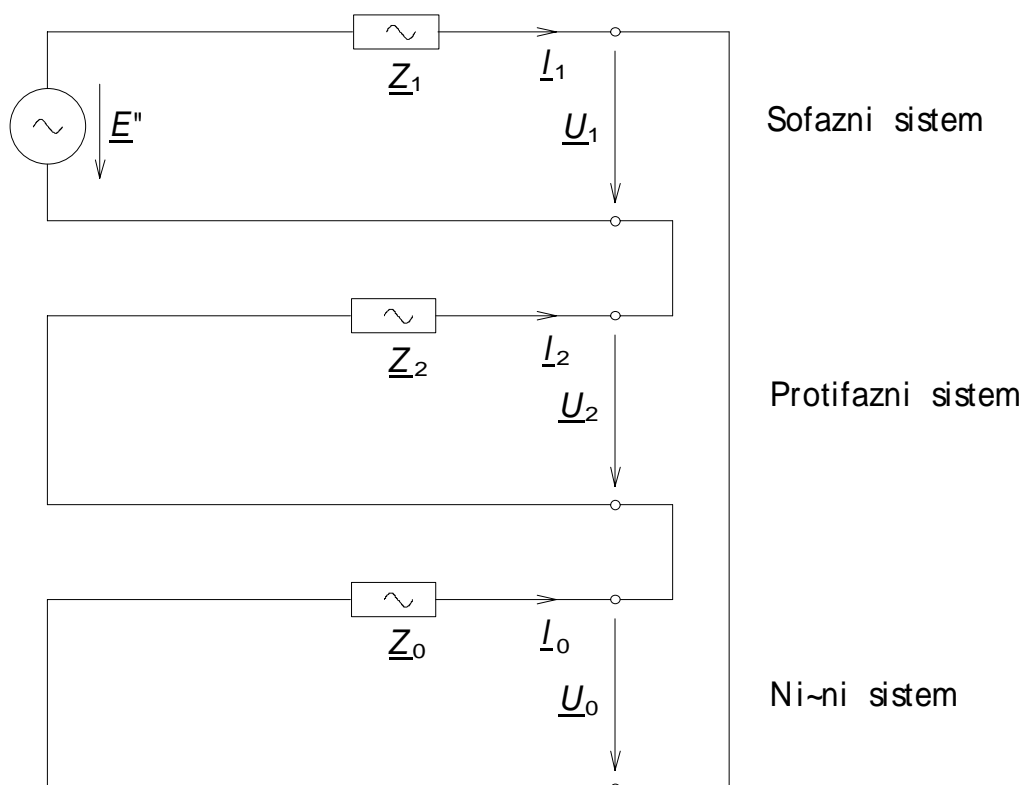


Slika 4.12 Shtična shema omrežja z enopolnim zemeljskim stikom

Fazne napetosti v zdravih vodnikih S in T dobimo na osnovi vstavljanja enačb (4.44) do (4.46) in enačbe (4.48) v enačbe (3.4)

$$\underline{U}_S = \underline{E}'' \left[\underline{a}^2 - \frac{\underline{a}^2 \underline{Z}_1 + \underline{a} \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \right] \text{ in} \quad (4.50)$$

$$\underline{U}_T = \underline{E}'' \left[\underline{a} - \frac{\underline{a} \underline{Z}_1 + \underline{a}^2 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \right]. \quad (4.51)$$



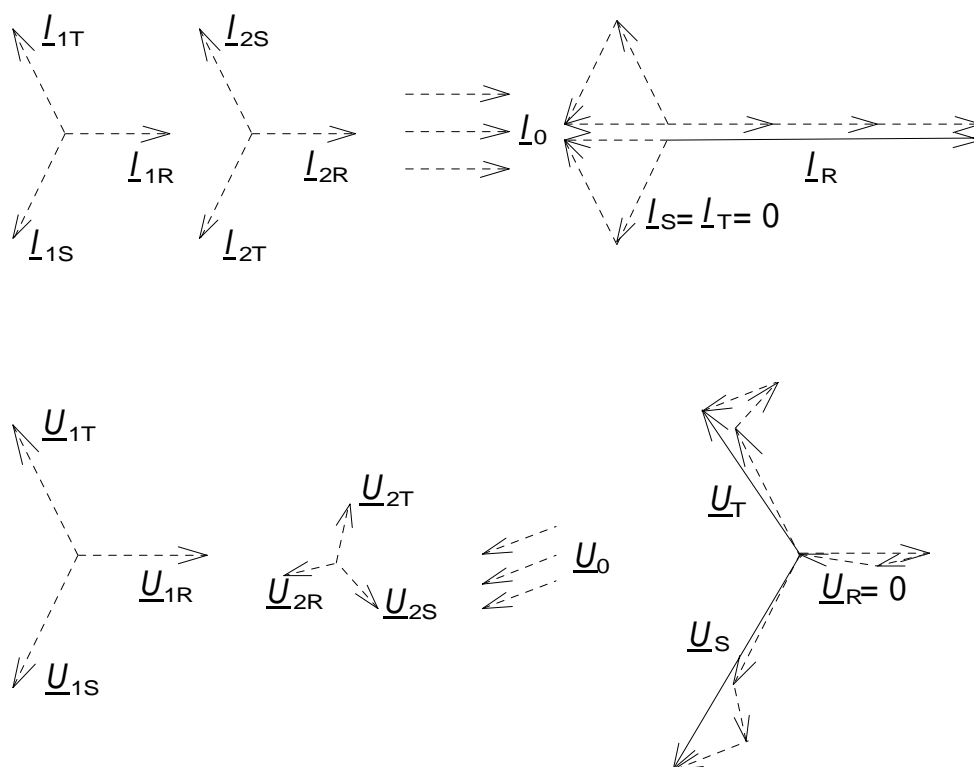
Slika 4.13a

(Slika 4.13a) Nadomestna shtična shema. Simetrične komponente omrežja za enopolni zemeljski stik.

TOKOVNE OBREMENTIVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

Slika 4.13b prikazuje kazalčne diagrame sofaznih, protifaznih in ničnih sistemov ter rezultirajoče komponente.

Vpogled v vpliv impedanc na velikosti enopolnega začetnega kratkostičnega izmeničnega toka prikazuje slika 4.14. Kratkostični izmenični tok je podan v odvisnosti od razmerja Z_0/Z_1 in kotne razlike $\varphi_1 - \varphi_0$. Za sofazno in protifazno impedanco je upoštevan najpogostejši primer, da je $Z_1 = Z_2$. Izbrana je osnovna oziroma bazna vrednost začetnega kratkostičnega izmeničnega toka $I_{k3}'' = E''/Z_1$, kar omogoča neposredno primerjavo tokovnih vrednosti v obeh primerih. Krivulje kažejo, da začetna vrednost kratkostičnega izmeničnega toka močno upada z večanjem kotne razlike $\varphi_1 - \varphi_0$. V teoretičnem primeru je pri $\varphi_1 - \varphi_0 = 180^\circ$ in $Z_0/Z_1 = 2$ vrednost omenjenega toka ∞ velika.



Slika 4.13b Komponente toka in napetosti pri enopolnem zemeljskem stiku

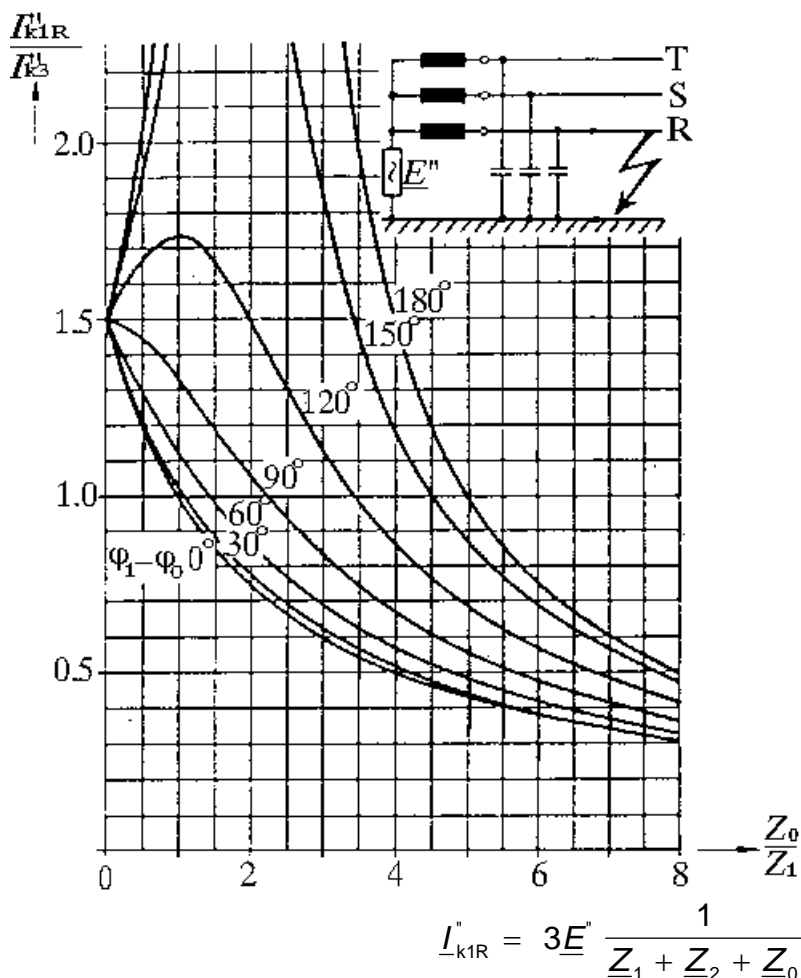
Vrednost razlike kotov $\varphi_1 - \varphi_0 > 90^\circ$ pomeni, da mora imeti nična impedanca kapacitivni karakter. To je teoretično možno le pri omrežjih z nezemljenim zvezdiščem. V praksi ne dopuščamo tako velike kapacitivnosti v omrežju in s tem majhnih kratkostičnih moči v omrežju.

V omrežjih z nizkoohmsko ozemljitvijo zvezdiščne točke, je običajna kotna razlika $\varphi_1 - \varphi_0 \leq 30^\circ$ tako, da je kratkostični tok lahko pri enopolnem kratkem stiku do 50% večji od toka pri tripolnem kratkem stiku.

TOKOVNE OBREMENTITVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

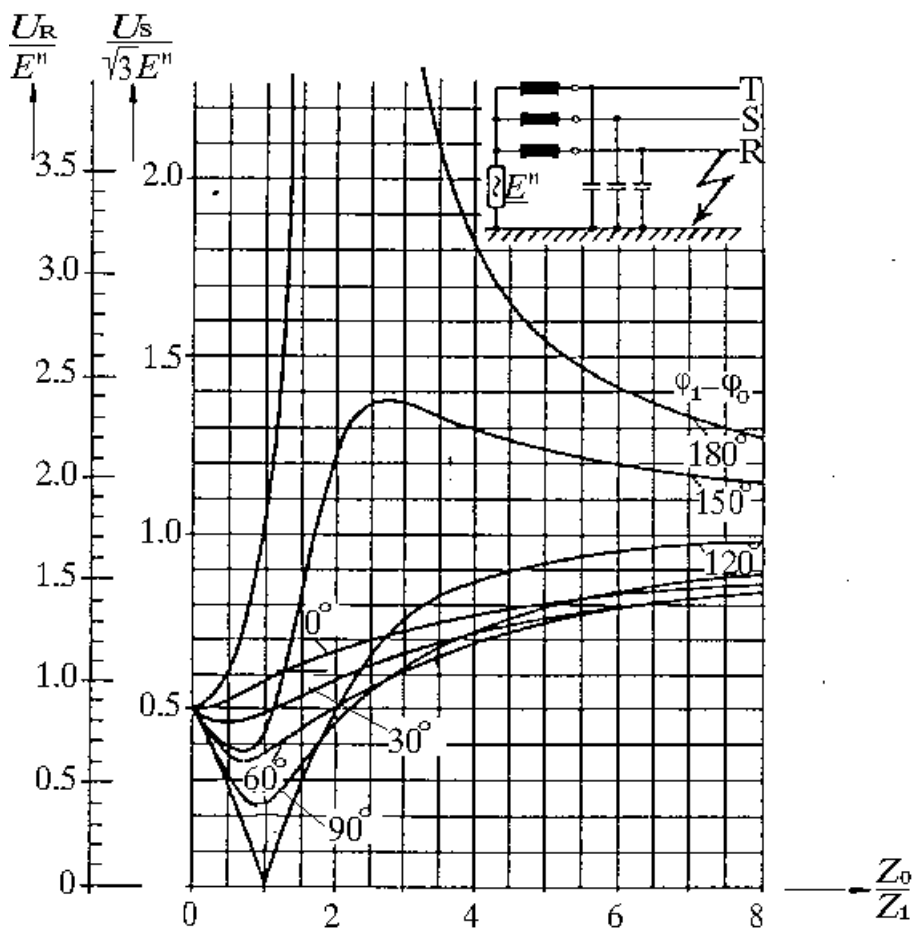
Na slikah 4.15 in 4.16 so prikazane fazne napetosti obratovalne frekvence zdravih vodnikov v odvisnosti od razmerja Z_0/Z_1 in kotne razlike $\varphi_1 - \varphi_0$. Za $Z_0 = 0$ je dobljena za oba vodnika enaka napetost $0.5 \cdot \sqrt{3} \cdot E''$.

Za vrednosti $Z_0 \rightarrow \infty$ potekajo vse krivulje proti vrednosti $\sqrt{3} \cdot E''$. Fazna napetost zdravega vodnika se potemtako približuje medfazni napetosti.



- E'' Aktivna napetost
- Z_0 Impedanca ničnega sistema
- Z_1 Impedanca sofaznega sistema
- Z_2 Impedanca protifaznega sistema
- $\varphi_1 - \varphi_0$ Kotna razlika $Z_1 - Z_0$
- $Z_1 = Z_2$

Slika 4.14 Enopolni zemeljski stik. Primerjava kratkostičnega toka I''_{k1R} z I''_{k3}

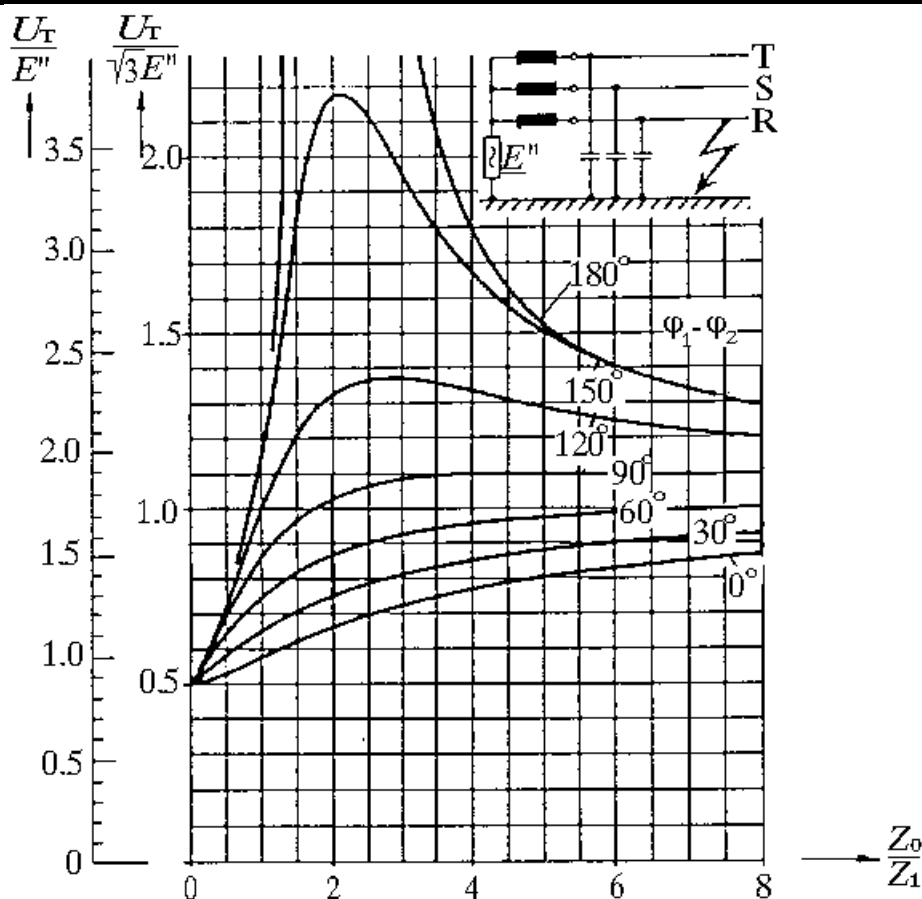


$$\underline{U}_S = \underline{E}' \cdot \left[\underline{a}^2 - \frac{\underline{a}^2 \underline{Z}_1 + \underline{a} \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \right]$$

- \underline{E}' Aktivna napetost
- \underline{Z}_0 Impedanca ničnega sistema
- \underline{Z}_1 Impedanca sofaznega sistema
- \underline{Z}_2 Impedanca protifaznega sistema
- \underline{a} Operator $(-0.5 + j0.87)$
- \underline{a}^2 Operator $(-0.5 - j0.87)$
- $\varphi_1 - \varphi_0$ Kotna razlika $\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0$
- $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$

Slika 4.15

Enopolni zemeljski stik. Primerjava fazne napetosti U_S vodnika S obratovalne frekvence, z $\sqrt{3} \cdot E''$ ali E'' .



$$\underline{U}_T = \underline{E}'' \cdot \left[a - \frac{a\underline{Z}_1 + a^2\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \right]$$

- \underline{E}'' Aktivna napetost
- \underline{Z}_0 Impedanca ničnega sistema
- \underline{Z}_1 Impedanca sofaznega sistema
- \underline{Z}_2 Impedanca protifaznega sistema
- a Operator $(-0.5 + j0.87)$
- a^2 Operator $(-0.5 - j0.87)$
- $\varphi_1 - \varphi_0$ Kotna razlika $\underline{Z}_1 - \underline{Z}_0$
- $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$

Slika 4.16

Enopolni zemeljski stik. Primerjava fazne napetosti U_T vodnika T, z $\sqrt{3} \cdot E''$ ali E''

Posebno visoka napetost se pojavi takrat, kadar je razlika impedančnih kotov $> 90^\circ$. Teoretični primer $\varphi_1 - \varphi_0 = 180^\circ$ pri $Z_0/Z_1 = 2$ ima za posledico neskončno vrednost napetosti. Kot je bilo že omenjeno, nastopa možen primer $\varphi_1 - \varphi_0 > 90^\circ$ praktično samo v omrežjih z neozemljenim zvezdiščem. V kolikor je kotna razlika negativna, se napetosti vodnikov zamenjajo. (Vrednost napetosti za vodnik S velja potem tudi za vodnik T in obratno).

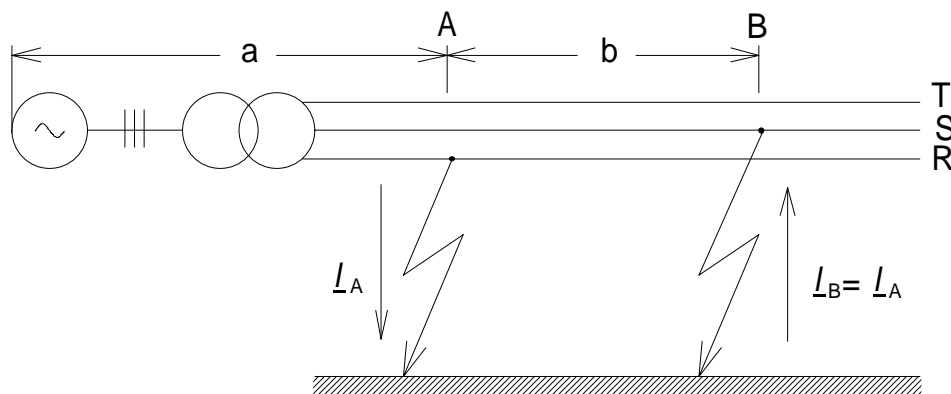
4.5 Dvojni zemeljski stik

Dvojni zemeljski stik je kratki stik na različnih mestih omrežja in na različnih vodnikih. Pretežno nastopa v omrežjih z neozemljenim zvezdiščem ali v omrežjih z zemeljskostično kompenzacijo. Samo v omenjenih omrežjih lahko nastopi povečanje napetosti v zdravih fazah ob enopolnem zemeljskem stiku, kar lahko ima za posledico, da pride do preskoka na še enem od zdravih vodnikov (torej do dvojnega zemeljskega kratkega stika). Pri tem kratkostični tok ni večji, kot pri dvopolnem kratkem stiku z in brez dotika z zemljo. Velikosti teh tokov so predvsem pomembne za preizkušanje zaščitnih naprav in za ugotavljanje ostalih vplivov (n.pr. na telefonske vode).

Primer na sliki 4.17 (enostransko napajani vod s kratkostičnim mestom A in B na vodniku R in S) bo pokazal pogoje in način izpeljave relacij, ki ustrezajo izračunu toka dvojnega zemeljskega stika, s pomočjo simetričnih komponent. Pri tem bo upoštevano omrežje z izoliranim zvezdiščem ali z izvedeno zemeljskostično kompenzacijo, kjer toke, ki tečejo preko kapacitivnosti nasproti zemlji in toke, ki se zaključujejo preko dušilke, na splošno ne upoštevamo.

Za kratkostično mesto A vodnika R velja naslednja zveza:

$$\underline{I}_{SA} = 0, \quad \underline{I}_{TA} = 0 \text{ in } \underline{U}_{RA} = 0. \quad (4.52)$$



Slika 4.17

(Slika 4.17) Stikalna shema omrežja z dvojnimi zemeljskimi stikom na enostransko napajanjem vodu

Z vstavljanjem v enačbo (3.3) in (3.4) dobimo

$$3\underline{I}_{1A} = \underline{I}_{RA} + \underline{a} \underline{I}_{SA} + \underline{a}^2 \underline{I}_{TA} = \underline{I}_{RA} \quad ,$$

$$3\underline{I}_{2A} = \underline{I}_{RA} + \underline{a}^2 \underline{I}_{SA} + \underline{a} \underline{I}_{TA} = \underline{I}_{RA}, \quad \underline{I}_{1A} = \underline{I}_{2A} = \underline{I}_{0A} = \frac{1}{3} \underline{I}_{RA}. \quad (4.53)$$

$$3\underline{I}_{0A} = \underline{I}_{RA} + \underline{I}_{SA} + \underline{I}_{TA} = \underline{I}_{RA} \quad ,$$

$$\underline{U}_{RA} = \underline{U}_{1A} + \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A} = 0 \quad . \quad (4.54)$$

Za kratkostično mesto B vodnika S velja

$$\underline{I}_{RB} = 0, \underline{I}_{TB} = 0, \underline{U}_{SB} = 0, \quad (4.55)$$

nadalje

$$3\underline{I}_{1B} = \underline{I}_{RB} + \underline{a} \underline{I}_{SB} + \underline{a}^2 \underline{I}_{TB} = \underline{a} \underline{I}_{SB},$$

$$3\underline{I}_{2B} = \underline{I}_{RB} + \underline{a}^2 \underline{I}_{SB} + \underline{a} \underline{I}_{TB} = \underline{a}^2 \underline{I}_{SB}, \quad \underline{a}^2 \underline{I}_{1B} = \underline{a} \underline{I}_{2B} = \underline{I}_{0B} = \frac{1}{3} \underline{I}_{SB}. \quad (4.56)$$

$$3\underline{I}_{0B} = \underline{I}_{RB} + \underline{I}_{SB} + \underline{I}_{TB} = \underline{I}_{SB},$$

$$\underline{U}_{SB} = \underline{a}^2 \underline{U}_{1B} + \underline{a} \underline{U}_{2B} + \underline{U}_{0B} = 0. \quad (4.57)$$

Pri izračunu potrebne nadomestne sheme, lahko izhajamo tudi iz navadnega kratkega stika z dotikom z zemljo. To pa zahteva vmesno shemo s transformatorji zato, ker pri obeh kratkostičnih mestih na posameznih vodnikih napetosti glede na fazni kot niso enake. Vezava transformatorjev po sliki 4.18 ustreza enačbama (4.54) in (4.57) za simetrične komponente napetosti. V povezavi transformatorjev, teče med R in 0 kratkostični tok \underline{I}_{RA} in med S in 0 tok \underline{I}_{SB} , ki teče preko obeh kratkostičnih mest (dvojni zemeljskostični tok). Pri stiku z zemljo preko upora, (prehodna upornost do zemlje ali upornost električnega obloka) obstajata povezavi preko upornosti \underline{Z}_{EA} in \underline{Z}_{EB} na sliki 4.18. Glede na dane predpostavke, gre prečna impedanca ničnega sistema $\rightarrow \infty$, torej teče dvojni zemeljskostični tok le med kratkostičnima mestoma A in B.

Trifazna shema po sliki 4.18 vsebuje skupno 18 transformatorjev, pri čemer jih 12 ni aktivnih. Zato jih ni potrebno upoštevati. S tem potemtakem komponentna shema za dvojni zemeljski stik preide v shemo s štirimi realnimi in dvema kompleksnima transformatorjema. Realni transformator prevaja 1:1, kompleksni zavrti napetost in tok v istem smislu v prenosnem razmerju 1:a in 1:a² za kot 120 oziroma za 240 stopinj, pri čemer ostane amplituda nespremenjena (glej stran 65).

V odgovarjajoči komponentni shemi slika 4.19a, ki vsebuje tudi impedance omrežja, potrebne za izračun, niso upoštevani trije realni transformatorji v fazi R zaradi tega, ker je transformacija 1:1. To ne vodi do nikakršne spremembe pri razdelitvi tokov in napetosti zato, ker so sistemi med seboj povezani galvanjsko le na enem mestu.

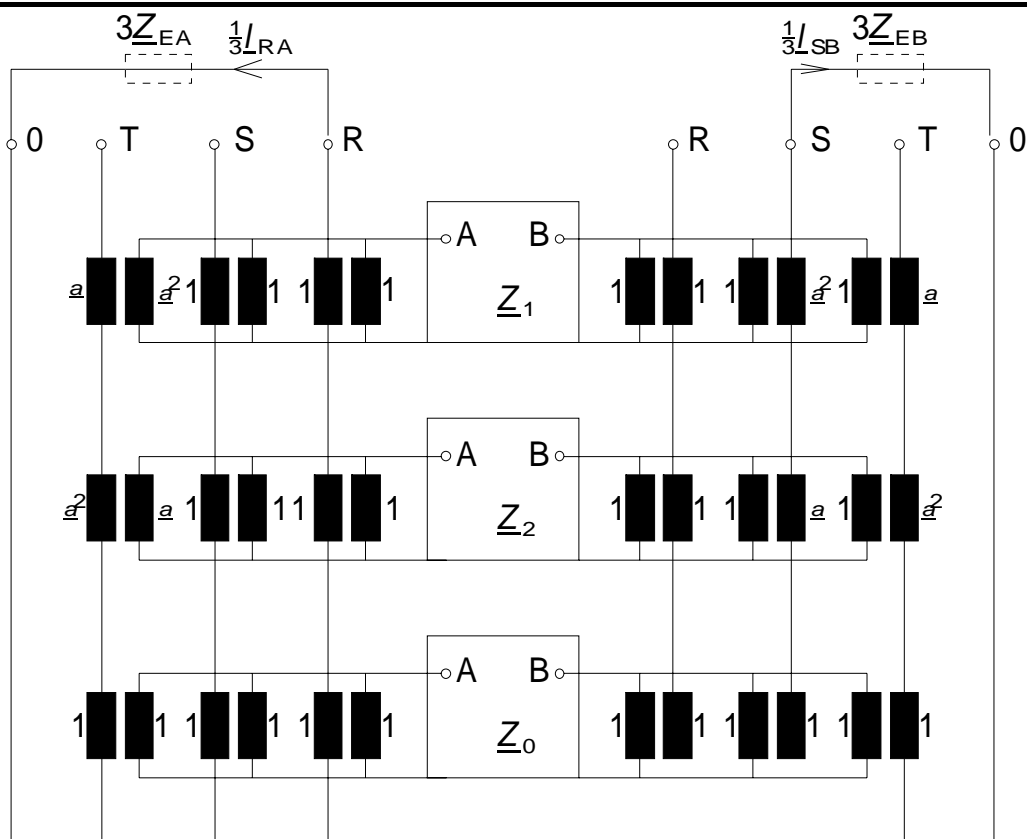
Na osnovi vezalne sheme lahko s pomočjo Kirchhoffovega pravila zapišemo naslednje enačbe (prečno impedanco ne upoštevamo):

$$\text{sofazni sistem:} \quad \underline{U}_{1B} = \underline{E}'' - \underline{I}_{1a} \underline{Z}_{1a} - \underline{I}_{1b} \underline{Z}_{1b}, \quad (4.58)$$

$$\text{protifazni sistem} \quad \underline{U}_{2B} = \quad - \underline{I}_{2a} \underline{Z}_{2a} - \underline{I}_{2b} \underline{Z}_{2b}, \quad (4.59)$$

$$\text{nični sistem} \quad \underline{U}_{0B} = \underline{I}_{1a} \underline{Z}_{1a} - \underline{E}'' + \underline{I}_{2a} \underline{Z}_{2a} - \underline{I}_{0b} \underline{Z}_{0b}. \quad (4.60)$$

V sofaznem in protifaznem sistemu vodnika S, povzroči vgrajeni transformator s kompleksnim prenosnim razmerjem 1:a in 1:a² kotni zasuk toka, kot je bilo prej omenjeno.



Slika 4.18

Tripolna stikalna shema za dvopolni zemeljski stik RS s simetričnimi komponentami pri uporabi realnih in kompleksnih transformatorjev.

V sofaznem sistemu je npr.:

$$\underline{I}_{1B} : \underline{I}_{0B} = 1 : \underline{a}^2, \text{ t.j.} \quad (4.61)$$

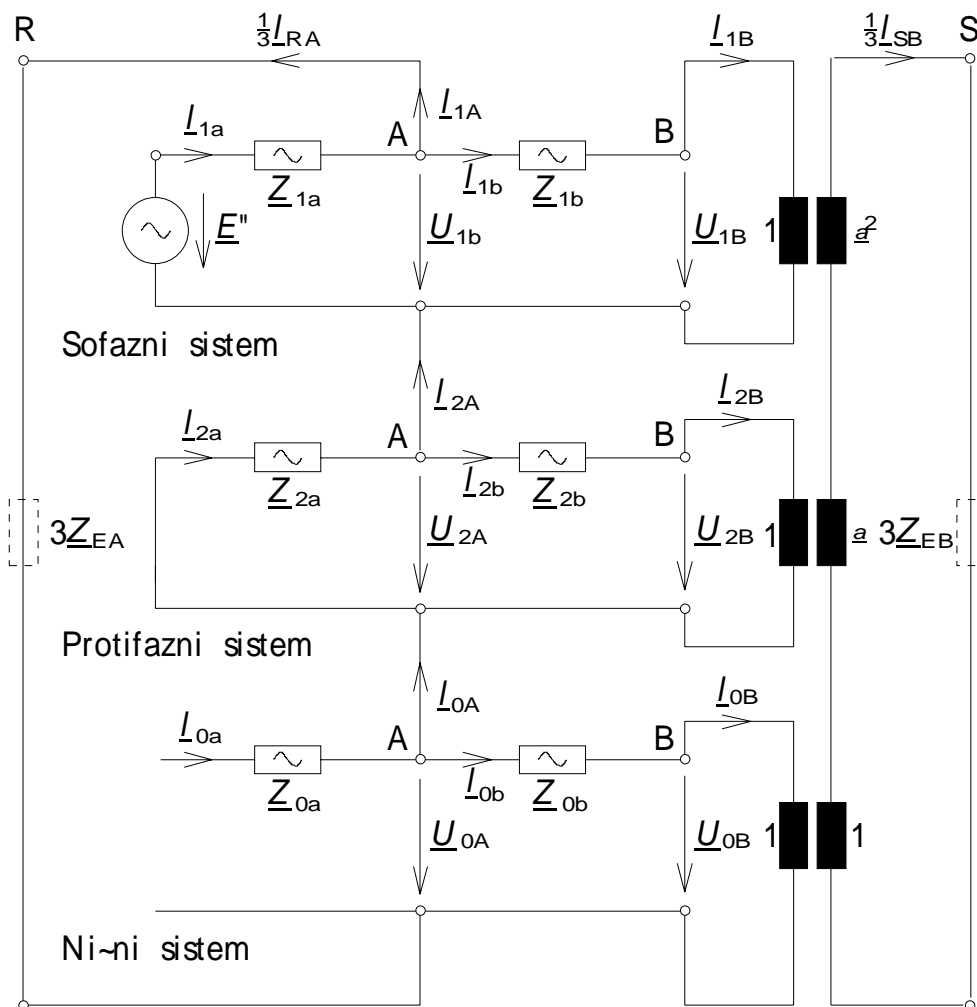
$$\underline{I}_{1B} = \underline{a} \underline{I}_{0B} .$$

v protifaznem sistemu je

$$\underline{I}_{2B} : \underline{I}_{0B} = 1 : \underline{a}, \text{ t.j.} \quad (4.62)$$

$$\underline{I}_{2B} = \underline{a}^2 \underline{I}_{0B}$$

in v ničnem sistemu brez kompleksne transformacije $\underline{I}_{0B} = \underline{I}_{0B} .$ (4.63)



Slika 4.19a

Nadomestna stikalna shema z impedanco omrežja, pri uporabi simetričnih komponent s kompleksnimi transformacijami za dvojni zemeljski stik. (predpostavljena primerjava ne upošteva prečne impendace v ničnem sistemu.)

Ker tečejo v danem primeru na kratkostičnih mestih A in B enako veliki tokovi in so si po smeri nasprotni, torej $I_{0B} = -I_{0A}$, dobimo za tokovne komponente sofaznega, protifaznega in ničnega sistema iz slike 4.19a in enačb (4.61) do (4.63) naslednje relacije:

$$I_{1b} = \underline{a} I_{0B} = -\underline{a} I_{0A} ; \quad I_{1a} = I_{0A} + I_{1b} = (1 - \underline{a}) I_{0A} , \quad (4.64)$$

$$I_{2b} = \underline{a}^2 I_{0B} = -\underline{a}^2 I_{0A} ; \quad I_{2a} = I_{0A} + I_{2b} = (1 - \underline{a}^2) I_{0A} , \quad (4.65)$$

$$I_{0b} = I_{0B} = -I_{0A} ; \quad I_{0a} = I_{0A} = 0 . \quad (4.66)$$

Z modificiranjem enačbe (4.57) dobimo za napetost na kratkostičnem mestu B naslednjo obliko zapisa:

$$(1-\underline{a}^2) \underline{E}'' - \underline{I}_{0A} (3\underline{Z}_{1a} + \underline{Z}_{1b}) - \underline{I}_{0A} (3\underline{Z}_{2a} + \underline{Z}_{2b}) - \underline{I}_{0A} \underline{Z}_{0b} = 0$$

in iz tega

$$\underline{I}_{0A} = -\underline{I}_{0B} = \frac{(1-\underline{a}^2) \underline{E}''}{(3\underline{Z}_{1a} + 3\underline{Z}_{2a}) + (\underline{Z}_{1b} + \underline{Z}_{2b} + \underline{Z}_{0b})} \quad (4.67)$$

Za $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ bo

$$\underline{I}_{0A} = -\underline{I}_{0B} = \frac{(1-\underline{a}^2) \underline{E}''}{(6\underline{Z}_{1a} + 2\underline{Z}_{1b} + \underline{Z}_{0b})} \quad (4.68)$$

Za dvojni zemeljskostični tok $\underline{I}_R = -\underline{I}_S = 3\underline{I}_0$ velja

$$\underline{I}_{kEE}'' = \frac{3 \underline{E}_\Delta''}{(6\underline{Z}_{1a} + 2\underline{Z}_{1b} + \underline{Z}_{0b})} \quad (4.69)$$

V nadaljevanju veljajo dane relacije za napetosti, ki se pojavijo.

Za kratkostično mesto A na vodniku R (glej enačbo (3.4) in sliko 4.19a):

$$\underline{U}_{RA} = \underline{U}_{1A} + \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A}; \quad \underline{U}_{1A} = \underline{E}'' - \underline{I}_{1a} \underline{Z}_{1a}, \quad (4.70)$$

$$\underline{U}_{SA} = \underline{a}^2 \underline{U}_{1A} + \underline{a} \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A}; \quad \underline{U}_{2A} = -\underline{I}_{2a} \underline{Z}_{2a}, \quad (4.71)$$

$$\underline{U}_{TA} = \underline{a} \underline{U}_{1A} + \underline{a}^2 \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A}; \quad \underline{U}_{0A} = \underline{I}_{1a} \underline{Z}_{1a} - \underline{E}'' + \underline{I}_{2a} \underline{Z}_{2a}. \quad (4.72)$$

Z vstavljanjem enačb (4.70) do (4.72) za komponentne napetosti \underline{U}_{1A} , \underline{U}_{2A} in \underline{U}_{0A} sledi

$$\underline{U}_{SA} = (\underline{a}^2 - 1) \underline{E}'' + (1-\underline{a}^2) \underline{I}_{1a} \underline{Z}_{1a} + (1-\underline{a}) \underline{I}_{2a} \underline{Z}_{2a} \quad (4.73)$$

$$\underline{U}_{TA} = (\underline{a} - 1) \underline{E}'' + (1-\underline{a}) \underline{I}_{1a} \underline{Z}_{1a} + (1-\underline{a}^2) \underline{I}_{2a} \underline{Z}_{2a}. \quad (4.74)$$

V kolikor komponente tokov \underline{I}_{1a} (4.64) in \underline{I}_{2a} (4.65) izrazimo z \underline{I}_{0A} se pojavijo na kratkostičnem mestu A vodnika R naslednje napetosti:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{RA} &= 0, \\ \underline{U}_{SA} &= \underline{j} \underline{a} \sqrt{3} \underline{E}'' \left[1 - \frac{3(\underline{Z}_{1a} + \underline{Z}_{2a})}{3(\underline{Z}_{1a} + \underline{Z}_{2a}) + (\underline{Z}_{1b} + \underline{Z}_{2b} + \underline{Z}_{0b})} \right], \quad (4.75) \\ \underline{U}_{TA} &= -\underline{j} \underline{a} \sqrt{3} \underline{E}'' \left[\underline{a} - \frac{3(\underline{a} \underline{Z}_{1a} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{2a})}{3(\underline{Z}_{1a} + \underline{Z}_{2a}) + (\underline{Z}_{1b} + \underline{Z}_{2b} + \underline{Z}_{0b})} \right]. \end{aligned}$$

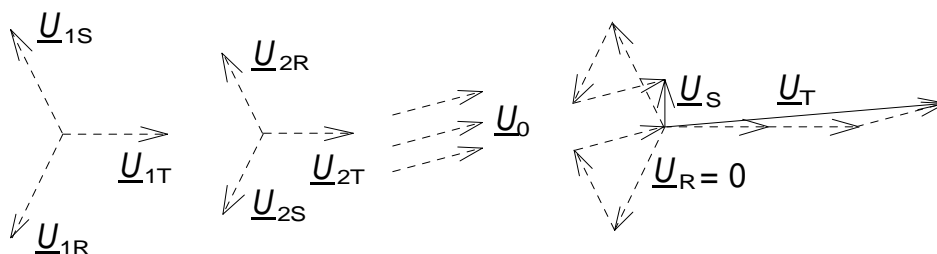
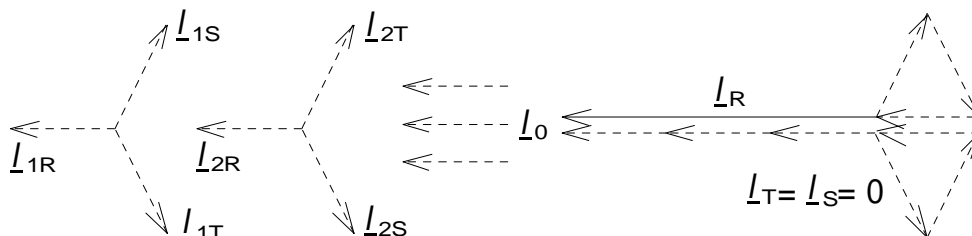
Na enak način lahko zapišemo za kratkostično mesto B vodnika S, da so enačbe za napetosti

$$\underline{U}_{RB} = -ja\sqrt{3} \underline{E}'' \frac{a\underline{Z}_{1b} + a^2\underline{Z}_{2b} + \underline{Z}_{0b}}{3(\underline{Z}_{1a} + \underline{Z}_{2a}) + (\underline{Z}_{1b} + \underline{Z}_{2b} + \underline{Z}_{0b})},$$

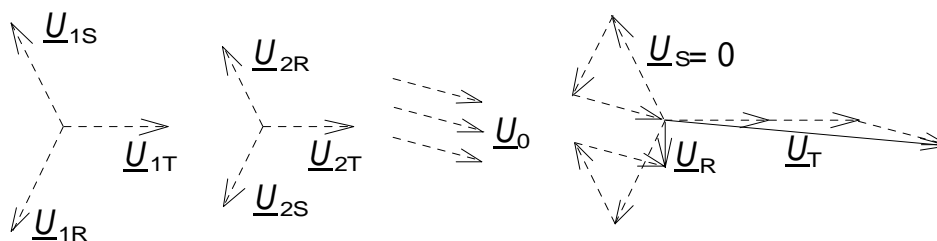
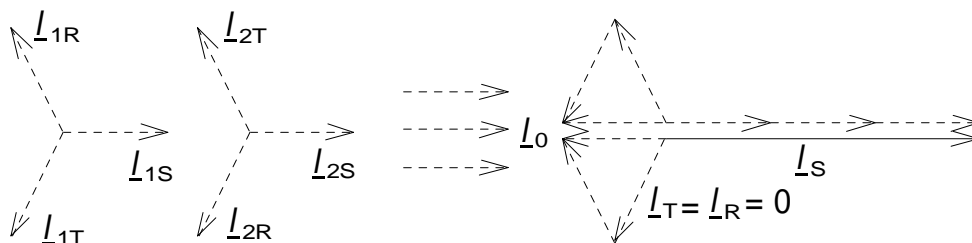
$$\underline{U}_{SB} = 0,$$

$$\underline{U}_{TB} = -ja\sqrt{3} \underline{E}'' \left[a \frac{3(a\underline{Z}_{1a} + a^2\underline{Z}_{2a}) - (a^2\underline{Z}_{1b} + a\underline{Z}_{2b} + \underline{Z}_{0b})}{3(\underline{Z}_{1a} + \underline{Z}_{2a}) + (\underline{Z}_{1b} + \underline{Z}_{2b} + \underline{Z}_{0b})} \right].$$
(4.76)

Kratkosti~no mesto A



Kratkosti~no mesto B



Pri čemer je:

$$\underline{I}_{1R} = \underline{I}_{1A} \quad \text{OZ.} \quad \underline{I}_{1B} \quad \underline{I}_{2R} = \underline{I}_{2A} \quad \text{OZ.} \quad \underline{I}_{2B}$$

$$\underline{U}_{1R} = \underline{U}_{1A} \quad \text{OZ.} \quad \underline{U}_{1B} \quad \underline{U}_{2R} = \underline{U}_{2A} \quad \text{OZ.} \quad \underline{U}_{2B}$$

Slika 4.19b

Tokovne in napetostne komponente pri dvojnem zemeljskem stiku

Slika 4.19b prikazuje kazalčne diagrame sofaznih, protifaznih in ničnih sistemov, in rezultirajoče komponente za kratkostični mesti A in B.

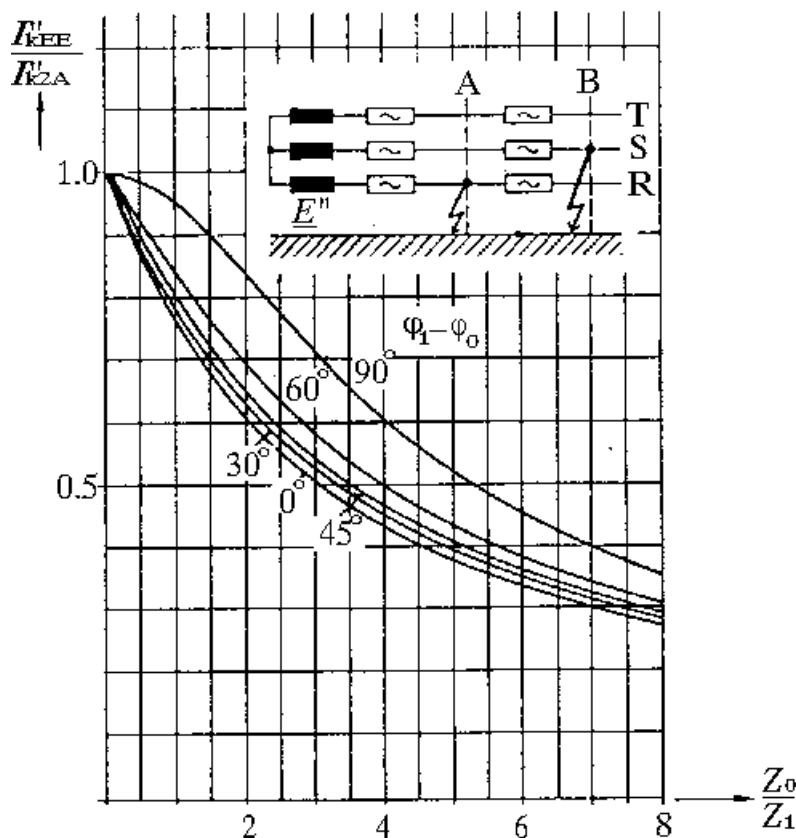
Na sliki 4.20 je podano razmerje I_{KEE}'' nasproti I_{k2A}'' v odvisnosti od Z_b/Z_a in kotne razlike $\underline{Z}_a - \underline{Z}_b$

Zaradi tega je kratkostični izmenični tok I_{k2}'' , pri dvopolnem kratkem stiku brez dotika z zemljo, izbran, kot bazna veličina. Kapacitivni nični tokovi pri tem ne bodo upoštevani, medtem ko sofazne in protifazne impedance upoštevamo, kot enako velike.

Na sliki 4.20 dobimo, da je I_{KEE}'' pri $\underline{Z}_b = 0$ enak I_{k2}'' torej obe kratkostični mesti A in B na vodniku R in S nastopita na istem mestu. Z večjo razdaljo mesta napake A in B, torej $\underline{Z}_b > 0$ bo $I_{KEE}'' < I_{k2}''$. Dvojni zemeljskostični tok I_{KEE}'' v nobenem primeru ne prekorači (neodvisno od razlike kotov impedanc $\underline{Z}_a - \underline{Z}_b$) kratkostičnega toka I_{k2}'' .

4.6 Primerjava kratkostičnih primerov pri različnih stanjih zvezdiščne točke

Ob primerjavi obravnavanih relacij za tripolni in dvopolni kratki stik dobimo, da pri dvopolnem kratkem stiku brez dotika z zemljo, kratkostični tok I_{k2}'' ne preseže $0,5 \cdot \sqrt{3}$ kratne vrednosti kratkostičnega toka I_{k3}'' pri tripolnem kratkem stiku, če je $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_1$. Nasprotno prikazujejo slike 4.16 do 4.24, da so lahko pri dvopolnem kratkem stiku z dotikom z zemljo in pri enopolnem zemeljskem stiku kratkostični tokovi I_{k2E}'' in I_{k1}'' večji, kot kratkostični tokovi I_{k3}'' . Poleg tega so možne povišane napetosti obratovalne frekvence na fazah, ki niso v okvari. Zaradi tega je potrebno prisotne predpostavke kritično pregledati.



$$I_{kEE}'' = \sqrt{3} \frac{E''}{3Z_{1a} + 3Z_{2a} + Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{0b}}$$

- E'' Aktivna napetost
- $Z_{1a} = Z_{2a}$ Impedance do točke A, vključno napetostni izvori
- $Z_{1b} = Z_{2b} \cdot Z_{0b}$ Impedance med točkama A do B
- $\varphi_a - \varphi_b$ Kotna razlika

Slika 4.20

(Slika 4.20) Primerjava dvojnega kratkostičnega toka I_{kEE}'' med vodnikom R (kratkostično mesto A) in vodnikom S (kratkostično mesto B) s tokom I_{k2A}'' .

Omrežje z izoliranim zvezdiščem

Kot je bilo že omenjeno, nastopajo v obeh prej omenjenih kratkostičnih primerih ekstremno visoke tokovne in napetostne vrednosti le takrat, kadar je kotna razlika v $Z_1 - Z_0$ velika in razmerje Z_0/Z_1 majhno. Velika kotna razlika nastopi, kadar je izključena kapacitivna ozemljitev zvezdiščne točke. To je možno le v omrežjih z izoliranim zvezdiščem. Da dosežemo pri takšnih omrežjih majhno razmerje Z_0/Z_1 , začetna vrednost kratkostičnega izmeničnega toka I_{k3}'' pri tripolnem kratkem stiku ne sme biti bistveno večja, kot je velikost polnilnega toka v medseboj povezanih vodih v omrežju. Tak primer se le redkokdaj dogodi. Na splošno je razmerje $Z_0/Z_1 \geq 5$.

Opomba: iz prevoda knjige R. Roesper-ja, *Kratkostični tokovi v trifaznih omrežjih* so povzeta določena poglavja. Zato poglavja ponekod ne sovpadajo z označevanjem enačb.

TOKOVNE OBREMENTITVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

Ker je pri dvopolnem kratkem stiku z dotikom z zemljo in pri enopolnem zemeljskem stiku začetna vrednost kratkostičnega izmeničnega toka manjša od toka pri tripolnem kratkem stiku

že pri razmerju nad $Z_0/Z_1=5$, ločimo torej oba kratkostična primera za ugotavljanje maksimalnih kratkostičnih tokov. Pri omrežjih z izoliranim zvezdiščem nastopi največja začetna vrednost kratkostičnega izmeničnega toka vedno pri tripolnem kratkem stiku.

Omrežja z zemeljskostično kompenzacijo

V teh omrežjih zvezdišče ni izolirano ampak je vezano z zemljo preko induktivne reaktance. Za rezultirajoče prečne impedance ničnega sistema ob neupoštevanju vzdolžne impedance vodov, velja naslednja zveza

$$\underline{Z}_0 = \frac{(3\underline{Z}_E + \underline{Z}_{0T}) \cdot \underline{Z}_C}{(\underline{Z}_E + \underline{Z}_{0T}) + \underline{Z}_C}$$

Z ozirom na vpliv zemeljskostične tuljave oziroma impedance zvezdiščne točke \underline{Z}_E na rezultirajočo impedanco ničnega sistema \underline{Z}_0 , razlikujemo tri primere:

primer a) $(3\underline{Z}_E + \underline{Z}_{0T}) + (\underline{Z}_C) = 0$

torej je induktivna impedanca $(3\underline{Z}_E + \underline{Z}_{0T})$ enaka kapacitivni impedanci \underline{Z}_C omrežja nasproti zemlji (nastavitev resonance $I_L = I_C$).

Rezultirajoča impedanca ničnega sistema \underline{Z}_0 , bo zelo velika. Preko zemlje teče le še majhen preostali tok. Kratkostični tok I_{k2E}'' pri dvopolnem kratkem stiku z dotikom z zemljo zavzame vrednost I_{k2}'' pri dvopolnem kratkem stiku brez dotika z zemljo, nasprotno pa je pri enopolnem zemeljskem stiku kratkostični tok I_{k1}'' približno enak nič. Največji začetni kratkostični izmenični tok nastopi tudi tu pri tripolnem kratkem stiku.

primer b) $|3\underline{Z}_E + \underline{Z}_{0T}| > |\underline{Z}_C|$

torej je induktivna impedanca $(3\underline{Z}_E + \underline{Z}_{0T})$ večja, kot kapacitivna impedanca \underline{Z}_C omrežja nasproti zemlji (podkompenzacija: $I_L < I_C$).

Impedanca ničnega sistema bo povečana zato, ker je induktivnost do zemlje paralelna s kapacitivnostjo omrežja. Pri tem ima nična impedanca kapacitivni karakter. Zemeljskostični tok je tu manjši, kot v omrežjih z izoliranim zvezdiščem.

Primer c) $|3\underline{Z}_E + \underline{Z}_{0T}| < |\underline{Z}_C|$

torej je induktivna impedanca $(3\underline{Z}_E + \underline{Z}_{0T})$ manjša kot kapacitivna impedanca \underline{Z}_C omrežja nasproti zemlji (nadkompenzacija $I_L > I_C$).

Impedanca ničnega sistema bo povečana, če induktivna impedanca $(3\underline{Z}_E + \underline{Z}_{0T})$ ne bo manjša od 50% kapacitivne impedance vodov nasproti zemlji. S to predpostavko bo nastali

TOKOVNE OBREMENITVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

kratkostični tok ravnotako manjši, kot pri omrežju z izoliranim zvezdiščem in s tem tudi pod vrednostjo začetnega kratkostičnega izmeničnega toka pri tripolnem kratkem stiku.

V kolikor je nasprotno ($3\underline{Z}_E + \underline{Z}_{OT}$) manjša od 50% reaktance omrežja, potem bo tudi impedanca ničnega sistema zmanjšana. Tako pridemo v področje nizkoohmske ozemljitve

zvezdiščne točke. Ker pa ima nična impedanca induktivni karakter, ostane razlika impedančnih kotov $\varphi_1 - \varphi_0$ med vrednostjo 0 in 90 stopinj. Ekstremne vrednosti napetosti in tokov, ki so posledica kotne razlike >90 stopinj, v omrežjih z ozemljenim zvezdiščem ne nastopajo. Zaradi zmanjšanja nične impedance, lahko postane razmerje $Z_0/Z_1 < 5$. Nastala začetna vrednost kratkostičnega izmeničnega toka, lahko postane zaradi tega večja, kot začetna vrednost kratkostičnega izmeničnega toka I_{k3}'' .

Primerjava slik 4.8 in 4.14 prikazuje, da nastopi v območju kotne razlike od 0 do 90 stopinj pri dvopolnem kratkem stiku z dotikom z zemljo nekoliko večja vrednost kratkostičnega izmeničnega toka, kot pri enopolnem kratkem stiku (zemeljski stik).

Omrežje z nizkoohmsko ozemljitvijo zvezdiščne točke

Nadaljnje zmanjšanje impedance ozemljila \underline{Z}_E na vrednost nič, vodi k nizkoohmski ozemljitvi zvezdiščne točke. V ničnem sistemu so kapacitivne impedance \underline{Z}_C med vodi in zemljo praktično kratko sklenjene. To zato, ker sta nični impedanci \underline{Z}_{OT} in \underline{Z}_{OE} precej manjši, kot \underline{Z}_C . Razmerje Z_0/Z_1 pod 0.5 je tu možno pri čemer pa ostane kotna razlika zopet znotraj področja med 0 in 90 stopinjami.

Pri kotnih razlikah, ki so večje od 90 so ekstremne vrednosti napetosti in tokov izključene. Pri enopolnem zemeljskem stiku lahko nastopi pod določenimi okoliščinami, začetna vrednost kratkostičnega toka, ki za cca 30% presega vrednosti tripolnega kratkega stika. Pri dvopolnem kratkem stiku z dotikom z zemljo, so možne vrednosti, ki dosegajo 50% večje vrednosti od kratkostičnega izmeničnega toka pri tripolnem kratkem stiku.

Fazna napetost (obratovalne frekvence) nepoškodovanega vodnika, doseže v najbolj neugodnem primeru 1,1 kratno vrednost obratovalne napetosti.

Sprememba tehniških predpisov VDE00111/12.66 govori o tem, da je visokonapetostno omrežje aktivno ozemljeno, če v primeru kratkega stika ozemljitveno število (razmerje fazne napetosti obratovalne frekvence nepoškodovanega vodnika nasproti dopustni maksimalni obratovalni napetosti) ne presega vrednosti 0,8. Takšno omrežje je torej lahko zgrajeno z zmanjšano izolacijo. Pri tem velja, da mora biti vrednost $Z_0/Z_1 \leq 5$ pri ($\varphi_1 - \varphi_0 = 0$). Kotne razlike, ki nastopajo v praksi n.pr. $\varphi_1 - \varphi_0 \leq 15^\circ$ ali 30° , dajejo za razmerje Z_0/Z_1 vrednost ≤ 4 ali ≤ 3 (slika 4.16).

Po novih predpisih VDE0111*pogl.1/10.79 in pogl. 3/10.80 je namesto ozemljitvenega števila U_{LE}/U_m vpeljan izraz ozemljitveni faktor napake $U_{LE}/U_{\lambda n}$. Dosedaj veljavne razlike v aktivno in neaktivno ozemljenih omrežjih odpadejo. V poglavju 3 novih VDE predpisov, so dana veljavna priporočila za izolacijske meritve. Na slikah 4.11, 4.14 in 4.16 je zato vključeno razmerje napetosti $U_{LE}/\sqrt{3} E''$ in U_{LE}/E'' .

TOKOVNE OBREMENITVE V NENORMALNIH OBRATOVALNIH STANJIH

Medtem, ko je v Nemčiji ozemljitev zvezdiščne točke v visokonapetostnih napravah direktna in v srednje napetostnih napravah najpogosteje preko tuljav za kompenzacijo zemeljskostičnega toka, je v inozemstvu ozemljeno veliko sredjenapetostnih naprav preko

ohmskega upora. Upor je najpogosteje določen tako, da kratkostični tok ni bistveno večji kot nazivni tok naprave.

Pregled in primerjava različnih kratkostičnih primerov kaže, da nastopi pri omrežjih z izoliranim zvezdiščem in v kompenziranih omrežjih, vedno največji začetni kratkostični izmenični tok pri tripolnem kratkem stiku. Nasprotno pa v omrežjih z neposredno ozemljitvijo, ali ozemljitvijo preko nizkoohmske impedance lahko pričakujemo največje začetne kratkostične izmenične toke pri eno ali dvopolnih kratkih stikih z dotikom z zemljo.