

# Modeliranje elemenata elektroenergetskog sustava za proračun kratkog spoja prema IEC 60909

---

**Butković, Petar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:868009>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**MODELIRANJE ELEMENATA ELEKTROENERGETSKOG  
SUSTAVA ZA PRORAČUN KRATKOG SPOJA PREMA IEC  
60909**

Rijeka, srpanj 2024.

Petar Butković

0069086876

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**MODELIRANJE ELEMENATA ELEKTROENERGETSKOG  
SUSTAVA ZA PRORAČUN KRATKOG SPOJA PREMA IEC  
60909**

Mentor: Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, srpanj 2024.

Petar Butković

0069086876

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**Izjava o samostalnoj izradi završnog rada**

Sukladno članku 7. *Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku sveučilišnih prijediplomskih studija*, izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj završni rad.

Rijeka, srpanj 2024.

---

Petar Butković



# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. NORMA IEC 60909.....	2
3. METODE PRORAČUNA STRUJA KRATKOG SPOJA.....	3
3.1. Metoda ekvivalentnog naponskog izvora na mjestu kratkog spoja.....	4
3.2. Metoda simetričnih komponenti .....	6
3.3. Maksimalna struja kratkog spoja .....	9
3.4. Minimalna struja kratkog spoja .....	9
4. IMPEDANCIJE ELEMENATA ZA VRIJEME KRATKOG SPOJA.....	11
4.1. Transformatori .....	11
4.1.1. Dvonamotni transformatori .....	11
4.1.2. Tronamotni transformatori .....	12
4.1.3. Korekcijski faktori mrežnih transformatora .....	13
4.1.4. Nadomjesne sheme dvonamotnih i tronamotnih transformatora .....	15
4.2. Sinkroni generatori .....	23
4.2.1. Nadomjesne sheme sinkronog generatora.....	25
4.3. Asinkroni motori.....	26
4.4. Aktivne mreže.....	28
4.5. Nadzemni vodovi.....	29
4.6. Prigušnice .....	30
4.7. Statički pretvarači .....	31
4.8. Kondenzatori i nerotirajući tereti.....	32
5. STRUJE KRATKOG SPOJA .....	33
5.1. Vrste kratkih spojeva .....	34
5.2. Početna struja kratkog spoja .....	35
5.2.1. Tropolni kratki spoj.....	36
5.2.2. Dvopolni kratki spoj.....	37

5.2.3.	Dvopolni kratki spoj sa zemljom .....	38
5.2.4.	Jednopolni kratki spoj .....	39
5.3.	Udarna struja kratkog spoja .....	39
5.3.1.	Tropolni kratki spoj .....	40
5.3.2.	Dvopolni kratki spoj .....	42
5.3.3.	Dvopolni kratki spoj sa zemljom .....	42
5.3.4.	Jednopolni kratki spoj .....	43
5.4.	Istosmjerna komponenta struje kratkog spoja .....	43
5.5.	Rasklopna struja kratkog spoja .....	44
5.6.	Struja mjerodavna za ugrijavanje .....	45
5.7.	Stacionarna struja kratkog spoja .....	46
6.	ZAKLJUČAK .....	48
7.	LITERATURA .....	49
8.	SAŽETAK .....	50

# 1. UVOD

Kako bi mogli dimenzionirati elemente elektroenergetskog sustava potrebno je provesti proračune za vrijeme trajanja kratkog spoja i modelirati elemente. Proračun struja kratkog spoja jedan je od najvažnijih proračuna u elektroenergetici. Provodi se s ciljem određivanja maksimalne i minimalne struje kratkog spoja na određenom mjestu u mreži. Vrijednost maksimalne struje služi nam za dimenzioniranje električne opreme, dok se pomoću vrijednosti minimalne struje određuju postavke zaštitnih uređaja.

U ovom radu prikazano je modeliranje raznih elemenata elektroenergetskog sustava, od generatora i transformatora pa sve do prigušnica i asinkronih motora. Isto tako radom su prikazane i određene metode izračuna struja kratkog spoja kao što su metoda simetričnih komponenti i metoda ekvivalentnog naponskog izvora na mjestu kratkog spoja.

U prvom poglavlju ukratko je predstavljena norma IEC 60909 na kojoj se ovaj rad temelji.

Nadalje, u drugom poglavlju prikazane su metode proračuna struja kratkog spoja s pripadnim primjerima te izrazi za izračun maksimalnih i minimalnih struja kratkog spoja.

Treće poglavlje prikazuje izraze za proračun impedancija elemenata mreže za vrijeme trajanja kratkog spoja. Isto tako prikazane su i nadomjesne sheme elemenata mreže za tri simetrična sustava prema metodi simetričnih komponenata.

U zadnjem poglavlju opisane su vrste struja koje se promatraju za vrijeme trajanja kratkog spoja te je svaka struja izražena pripadnim izrazima za različite vrste kratkih spojeva, odnosno za različite periode u vremenu trajanja kratkog spoja.



## 2. NORMA IEC 60909

IEC je međunarodni elektrotehnički odbor čija je zadaća promocija međunarodne suradnje na pitanjima koja uključuju standardizaciju na svim poljima elektrotehnike. Među brojnim aktivnostima je i donošenje međunarodnih normi, među kojima je i norma IEC 60909 koja je vezana za proračun struja kratkog spoja, na kojoj je ovaj rad baziran.

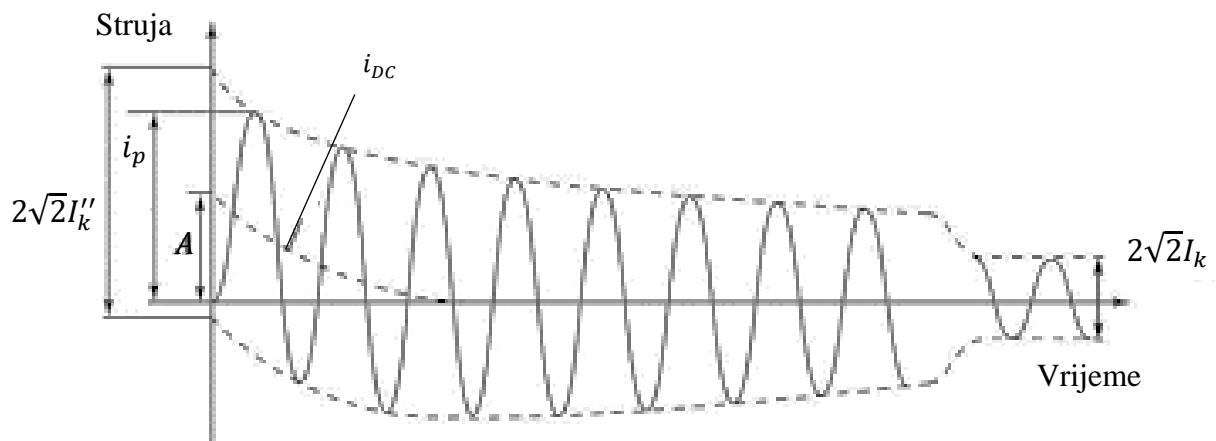
Norma IEC 60909 može se koristiti s dovoljnom preciznošću za proračune kratkog spoja u niskonaponskim i visokonaponskim trofaznim izmjeničnim sustavima nazivne frekvencije 50 ili 60 Hz do napona od 550 kV .

Prema IEC 60909, proračun impedancija kratkog spoja temelji se na nazivnim podacima električne opreme i topološkom rasporedu sustava te ima prednost da se može koristiti za postojeći sustav kao i za sustav u fazi planiranja.

Treba napomenuti kako ova norma ne obuhvaća kratke spojeve koji su namjerno izazvani u kontroliranim uvjetima te se ne bavi proračunima kratkog spoja u instalacijama brodova i aviona.

### 3. METODE PRORAČUNA STRUJA KRATKOG SPOJA

Potpuni proračun struja kratkog spoja kao rješenje bi trebao dati struje kao funkcije vremena na mjestu nastanka kratkog spoja za vrijeme trajanja kratkog spoja, prilikom kojeg je napon jednak vrijednosti u početku nastanka kratkog spoja. No, u većini praktičnih slučajeva takvo određivanje nije potrebno. Ovisno o primjeni rezultata, dovoljno je poznavati efektivnu vrijednost simetrične izmjenične komponente i udarnu struju  $i_p$ . Udarana struja je maksimalna tjemena vrijednost struje kratkog spoja od njegovog nastanka, a ovisi o vremenskoj konstanti opadajuće istosmjerne komponente i frekvencije  $f$ , odnosno o omjeru  $\frac{R}{X}$  impedancije kratkog spoja  $Z_k$ , a postiže se ukoliko je u trenutku nastanka kratkog spoja vrijednost napona jednaka nuli. Struja  $i_p$  isto tako ovisi opadanju simetrične izmjenične komponente struje kratkog spoja, što prikazuje slika 3.1..



- $I_k''$  početna struja kratkog spoja
- $i_p$  udarna struja
- $I_k$  stacionarna struja kratkog spoja
- $i_{DC}$  istosmjerna komponenta struje kratkog spoja
- A početna vrijednost istosmjerne komponente

Slika 3.1. Struja kratkog spoja s opadajućom izmjeničnom komponentom [1]

Kako bi se pojednostavio izračun, u skladu s normom IEC 60909, uvedeno je nekoliko pretpostavki:

- a) Za vrijeme trajanja kratkog spoja nema promjena u vrsti kratkog spoja.
- b) Za vrijeme kratkog spoja nema promjena u mreži u kojoj je došlo do kratkog spoja.
- c) Za impedanciju transformatora se uzima da je regulacijska preklopka u neutralnoj poziciji.
- d) Zanemaruje se otpor električnih lukova.
- e) Zanemaruju se svi linijski kapaciteti, paralelne admitancije i nerotirajući tereti, osim onih u nultom sustavu.

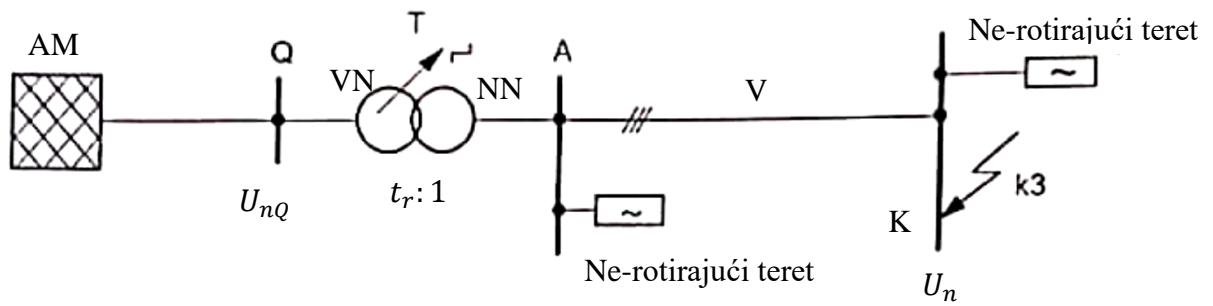
Nadalje, prilikom proračuna kratkog spoja u sustavima različitih naponskih razina potrebno je vrijednosti impedancije preračunati na istu razinu napona, obično onu na kojoj je došlo do kratkog spoja.

Impedancije elemenata u superponiranim ili subordiniranim mrežama moraju se podijeliti ili pomnožiti sa kvadratom transformacijskog omjera  $t_r$ , dok se naponi i struje preračunavaju pomoću nazivnog transformacijskog omjera  $t_r$ .

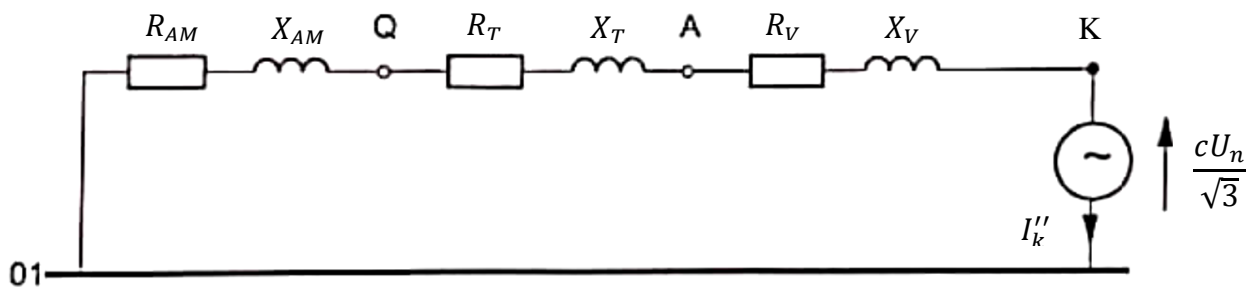
### 3.1. Metoda ekvivalentnog naponskog izvora na mjestu kratkog spoja

Ova metoda bazira se na uvođenju ekvivalentnog naponskog izvora na mjestu nastanka kratkog spoja. Ekvivalentni naponski izvor tada predstavlja jedini aktivni naponski izvor u mreži, odnosno sve aktivne mreže, sinkroni i asinkroni motori su zamijenjeni svojim pripadnim impedancijama. Prilikom proračuna zanemaruju se radni podaci i opterećenje potrošača, položaj regulacijske preklopke transformatora te uzbude generatora. Pomoću ekvivalentnog naponskog izvora moguće je odrediti struju kratkog spoja za sve moguće slučajeve.

Na slici 3.2. prikazan je primjer mreže u kojoj je došlo do trofaznog kratkog spoja na mjestu označenom slovom K. Slika 3.3. prikazuje direktni sustav mreže na prijašnjoj slici. Na mjestu nastanka kratkog spoja nalazi se ekvivalentni naponski izvor napona  $\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$ . Uz pretpostavku da su ostali aktivni izvori jednaki nuli, aktivna mreža, transformator i vod zamijenjeni su pripadnim impedancijama preračunatim na niskonaponsku stranu. Impedancije pasivnih tereta se zanemaruju.  $I_k''$  označava traženu struju na početku kratkog spoja.



Slika 3.2. Prikaz mreže [1]



Slika 3.3. Prikaz nadomjesne sheme direktnog sustava [1]

Ukoliko nacionalnom normom nije zadano drugačije, prema normi IEC 60909 uvodi se faktor preopterećenja  $c$  prema tablici 3.1., s pretpostavkom da najveći mogući napon u normalnim mrežama u prosjeku ne prelazi približno +5% (u NN mrežama) ili +10% (u VN mrežama) od nazivnog napona.

Tablica 3.1. Faktor preopterećenja  $c$  [2]

Nazivni napon $U_n$	Faktor preopterećenja $c$ za proračun	
	Maksimalnih struja KS $c_{max}$	Minimalnih struja KS $c_{min}$
Niski napon 100 V – 1000 V	1,05 1,10	0,95
Srednji napon 1 kV – 35 kV	1,10	1,00
Visoki napon > 35 kV		

### 3.2. Metoda simetričnih komponenti

Metoda simetričnih komponenti omogućuje pojednostavljenje proračuna struja kratkog spoja kod nesimetričnih trofaznih sustava na način da se nesimetrični sustav rastavlja na tri simetrična trofazna sustava koji se nazivaju:

- direktni sustav;
- inverzni sustav;
- nulti sustav.

Direktni sustav opisuje mrežu u stacionarnom stanju, inverzni sustav definira nesimetrije u mreži, dok nulti sustav označava spoj sa zemljom.

Koristeći ovu metodu, do struja u pojedinim fazama dolazi se superponiranjem struje direktnog sustava  $I_1$ , inverznog sustava  $I_2$  i nultog sustava  $I_0$ .

Uzimajući fazu L1 kao referentnu točku, dobivamo da su struje faza  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  i  $I_{L3}$  jednake:

$$I_{L1} = I_1 + I_2 + I_0 \quad (3.1)$$

$$I_{L2} = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad (3.2)$$

$$I_{L3} = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \quad (3.3)$$

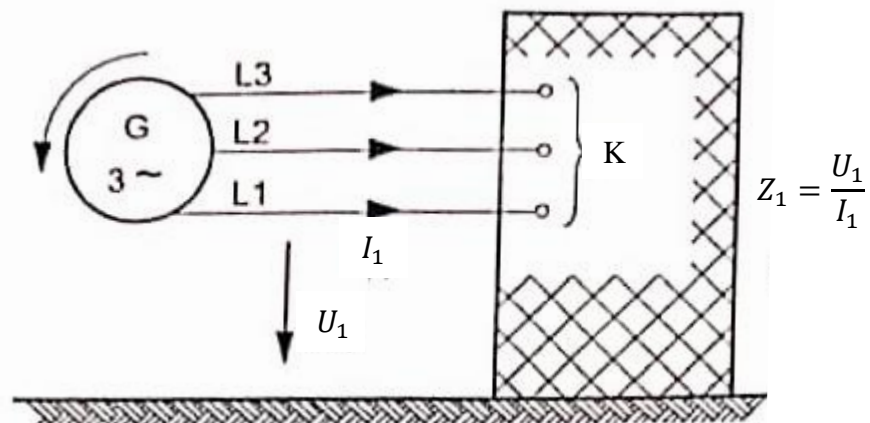
gdje je:

$a$  operator zakretanja jednak:

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (3.4)$$

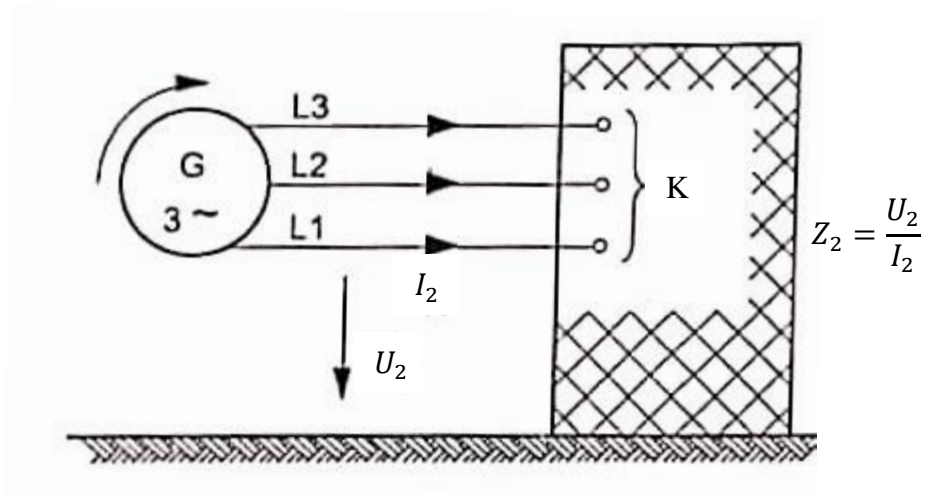
$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (3.5)$$

Svaki od prije navedenih sustava ima svoju vlastitu impedanciju. Impedancija direktnog sustava  $Z_1$  dobije se kada simetrični sustav napona, opće prihvaćenog redoslijeda faza, napaja mjesto kratkog spoja te su svi sinkroni i asinkroni motori zamijenjeni pripadnim impedancijama (slika 3.4.).



Slika 3.4. Impedancija direktnog sustava [1]

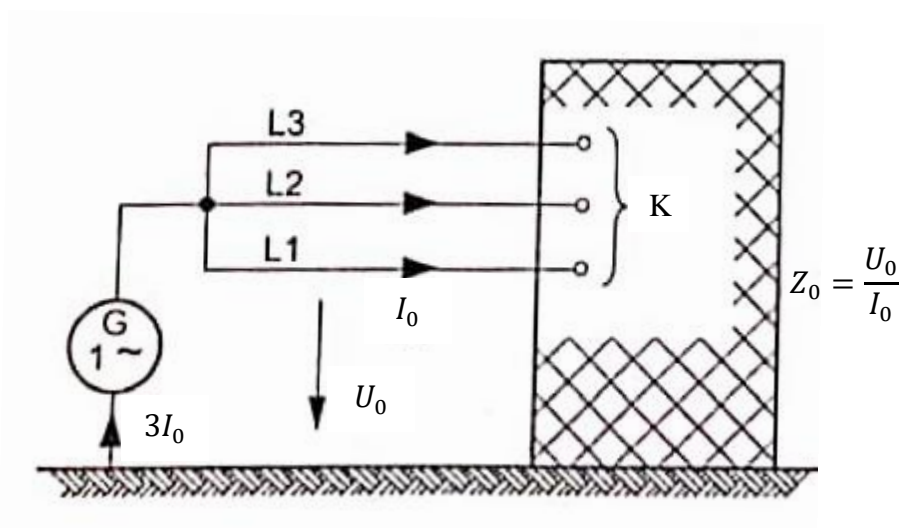
Impedanciju inverznog sustava  $Z_2$  dobiva se na način da se mjesto kratkog spoja napaja simetričnim sustavom napona s obrnutim redoslijedom faza (slika 3.5.).



Slika 3.5. Impedancija inverznog sustava[1]

Vrijednosti direktne i inverzne impedancije mogu se razlikovati jedino u slučajevima s rotacijskim strojevima. U slučaju kratkog spoja nastalog daleko od generatora, opće je prihvaćeno da se kod proračuna uzima  $Z_2 = Z_1$ .

Impedancija nultog sustava dobiva se kada se izmjenični napon dovede između tri kratko spojena fazna vodiča i povratnog voda (npr. uzemljenje, neutralni vodič, izolacija kabela, itd.), što je prikazano na slici 3.6.. Osim u posebnim slučajevima, impedancija nultog sustava biti će različita od direktne i inverzne impedancije.



Slika 3.6. Impedancija nultog sustava [1]

Prilikom izračuna impedancija direktnog, inverznog i nultog sustava na niskonaponskim mrežama, moguće je zanemariti kapacitivnost nadzemnih vodova i kabela. Treba napomenuti da zanemarivanjem kapacitivnosti vodova nultog sustava kod sustava s uzemljenim zvjezdištem dolazi do blago većih vrijednosti od onih u stvarnosti ovisno o konfiguraciji mreže.

### 3.3. Maksimalna struja kratkog spoja

Prilikom proračuna maksimalne struje kratkog spoja nužno je uvesti slijedeće uvjete:

- faktor predopterećenja  $c_{max}$ , prije prikazan u tablici 3.1., mora se koristiti kod proračuna maksimalne struje kratkog spoja, ukoliko nije drugačije uvjetovano nacionalnim standardom
- odabrati konfiguraciju sustava u kojem je doprinos elektrana i ostalih izvora maksimalan, što dovodi do maksimalne vrijednosti struje kratkog spoja
- za iznos impedancije koja predstavlja ostatak mreže, uzima se njena najmanja vrijednost
- motori se ne zanemaruju
- na temperaturi od 20 °C u izračun se uvodi otpor vodova  $R_L$

### 3.4. Minimalna struja kratkog spoja

Kod proračuna minimalne struje kratkog spoja potrebno je obratiti pažnju na slijedeće uvjete:

- prema tablici 3.1. za izračun koristi se faktor predopterećenja  $c_{min}$
- za konfiguracija mreže uzeti onu u kojoj je doprinos elektrana i ostalih izvora minimalan
- zanemariti motore
- na višim temperaturama uvesti otpor vodova  $R_L$  prema izrazu:

$$R_L = [1 + \alpha(\theta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \quad (3.6)$$

gdje je:

$R_{L20}$  otpor na temperaturi od 20 °C,



- $\theta_e$  temperatura vodiča u °C na kraju trajanja kratkog spoja
- $\alpha$  faktor jednak 0,004/K, dovoljno precizan za većinu proračuna s bakrom, aluminijem i aluminijskom legurom

## 4. IMPEDANCIJE ELEMENATA ZA VRIJEME KRATKOG SPOJA

Prema IEC 60909 normi, za određene elemente elektroenergetskog sustava, kao što su transformatori, aktivne mreže, vodovi, prigušnice i sl., impedancija direktnog sustava jednaka je inverznoj impedanciji  $Z_1 = Z_2$ .

Impedancija nultog sustava  $Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$  određuje se pomoću izmjeničnog napona između tri međusobno paralelne faze i spoja sa zemljom te struje kroz jednu od faza.

U skladu s normom IEC 60909, impedancije generatora, mrežnih transformatora i elektrana potrebno je pomnožiti odgovarajućim korekcijskim faktorima prilikom proračuna struja kratkog spoja s ekvivalentnim naponskim izvorom na mjestu nastanka kratkog spoja.

### 4.1. Transformatori

#### 4.1.1. Dvonamotni transformatori

Direktna impedancija dvonamotnog transformatora  $Z_T = R_T + jX_T$  računa se prema izrazu:

$$Z_T = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad (4.1)$$

$$R_T = \frac{u_R}{100\%} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{P_{knT}}{3I_{nT}^2} \quad (4.2)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4.3)$$

gdje je:

$U_{nT}$  nazivni napon transformatora,

$I_{nT}$  nazivna struja transformatora,

$S_{nT}$  nazivna prividna snaga transformatora,

$P_{knT}$  ukupni gubici u bakru transformatora pri nazivnoj struji,

- $u_k$  relativna vrijednost napona kratkog spoja pri nazivnoj struji,  
 $u_{Rn}$  nazivna vrijednost djelatne komponente napona kratkog spoja.

Djelatna komponenta napona kratkog spoja  $u_{Rn}$  može se izračunati preko gubitaka u bakru  $P_{knT}$  i nazivne struje  $I_{nT}$  s iste naponske razine transformatora (jednadžba (4.2)).

Omjer  $R_T/X_T$  smanjuje se veličinom transformatora, odnosno veliki transformatori imaju zanemarivo mali otpor te se za vrijednost impedancije može uzeti samo vrijednost reaktancije. Otpor je potrebno uzeti u obzir u slučaju proračuna udarne struje ili istosmjernje komponente struje kratkog spoja.

Inverzna impedancija dvonamotnog transformatora jednaka je direktnoj impedanciji. Podatke za impedanciju nultog sustava računatu prema izrazu  $Z_{0T} = R_{0T} + jX_{0T}$  moguće je pronaći na natpisnoj pločici transformatora ili kod samog proizvođača.

#### 4.1.2. Tronamotni transformatori

Direktne impedancije tronamotnog transformatora  $Z_A$ ,  $Z_B$  i  $Z_C$  računaju se pomoću impedancija pojedinih namota transformatora koje se dobivaju iz pokusa kratkog spoja. Pokus kratkog spoja provodi se tako da je na jedan namot narinut trofazni napon, dok je pritom drugi namot kratko spojen, a treći otvoren. Uz referentni namot A dobivaju se izrazi:

$$Z_{AB} = \left( \frac{u_{RnAB}}{100\%} + j \frac{u_{XnAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{nTA}^2}{S_{nTAB}} \quad (4.4)$$

$$Z_{AC} = \left( \frac{u_{RnAC}}{100\%} + j \frac{u_{XnAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{nTA}^2}{S_{nTAC}} \quad (4.5)$$

$$Z_{BC} = \left( \frac{u_{RnBC}}{100\%} + j \frac{u_{XnBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{nTA}^2}{S_{nTBC}} \quad (4.6)$$

$$u_{Xn} = \sqrt{u_k^2 - u_{Rn}^2} \quad (4.7)$$

iz čega slijede izrazi:

$$Z_A = \frac{1}{2}(Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC}) \quad (4.8)$$

$$Z_B = \frac{1}{2}(Z_{BC} + Z_{AB} - Z_{AC}) \quad (4.9)$$

$$Z_C = \frac{1}{2}(Z_{AC} + Z_{BC} - Z_{AB}) \quad (4.10)$$

gdje je:

- $U_{nTA}$  nazivni napon namota A,
- $S_{nTAB}$  nazivna prividna snaga između namota A i B,
- $S_{nTAC}$  nazivna prividna snaga između namota A i C,
- $S_{nTBC}$  nazivna prividna snaga između namota B i C,
- $u_{RnAB}, u_{XnAB}$  nazivne vrijednosti djelatnih i reaktivnih komponenata napona kratkog spoja,
- $u_{RnAC}, u_{XnAC}$  nazivne vrijednosti djelatnih i reaktivnih komponenata napona kratkog spoja,
- $u_{RnBC}, u_{XnBC}$  nazivne vrijednosti djelatnih i reaktivnih komponenata napona kratkog spoja.

#### 4.1.3. Korekcijski faktori mrežnih transformatora

Mrežni transformator je transformator koji povezuje dvije ili više mreža, različitih razina napona. Kod izračuna impedancija dvonamotnih transformatora uvodi se korekcijski faktor transformatora  $K_T$  prema izrazu:  $Z_{TK} = K_T Z_T$  gdje je  $Z_T = R_T + jX_T$ , odnosno vrijedi:

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1+0,6x_T} \quad (4.11)$$

$$x_T = X_T \frac{S_{nT}}{U_{nT}^2} \quad (4.12)$$

gdje je:

- $x_T$  relativna reaktancija transformatora,
- $c_{max}$  faktor predopterećenja prema tablici 3.1.,
- $U_{nT}$  nazivni napon transformatora,
- $S_{nT}$  nazivna prividna snaga transformatora.

Ukoliko su poznate pogonske prilike transformatora prije nastanka kratkog spoja, umjesto izraza (4.11) moguće je koristiti sljedeći izraz:

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_T (I_T^b / I_{nT}) \sin \varphi_T^b} \quad (4.13)$$

gdje je:

- $U^b$  maksimalni pogonski napon prije nastanka kratkog spoja,
- $I_T^b$  maksimalna pogonska struja prije nastanka kratkog spoja,
- $\varphi_T^b$  kut faktora snage prije nastanka kratkog spoja.

Korekcijski faktor treba primijeniti i kod izračuna impedancije inverznog i nultog sustava dvonamotnih transformatora, no ne primjenjuje se na impedanciju uzemljenja zvjezdišta transformatora.

Za tronamotne transformatore, koristeći relativne vrijednosti reaktancija transformator  $x_T$ , uvode se tri korekcijska faktora prema izrazima:

$$K_{TAB} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TAB}} \quad (4.14)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TAC}} \quad (4.15)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TBC}} \quad (4.16)$$

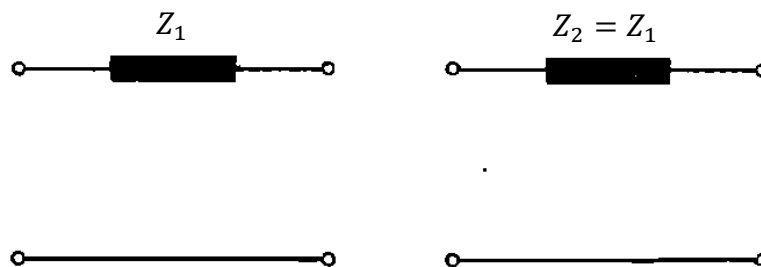
Nadalje, koristeći korekcijske faktore dobivaju se ispravljene vrijednosti impedancija prema izrazima:  $Z_{ABK} = K_{TAB}Z_{AB}$ ,  $Z_{ACK} = K_{TAC}Z_{AC}$  i  $Z_{BCK} = K_{TBC}Z_{BC}$ . Ispravljene vrijednosti impedancija pojedinog namota  $Z_{AK}$ ,  $Z_{BK}$  i  $Z_{CK}$  dobivaju se prema izrazima od (4.8) do (4.10).

Kao i kod dvonamotnih transformatora, korekcijske faktore također treba primijeniti na impedancije inverznog i nultog sustava, ali ne i na impedanciju između zvjezdišta i zemlje.

#### 4.1.4. Nadomjesne sheme dvonamotnih i tronamotnih transformatora

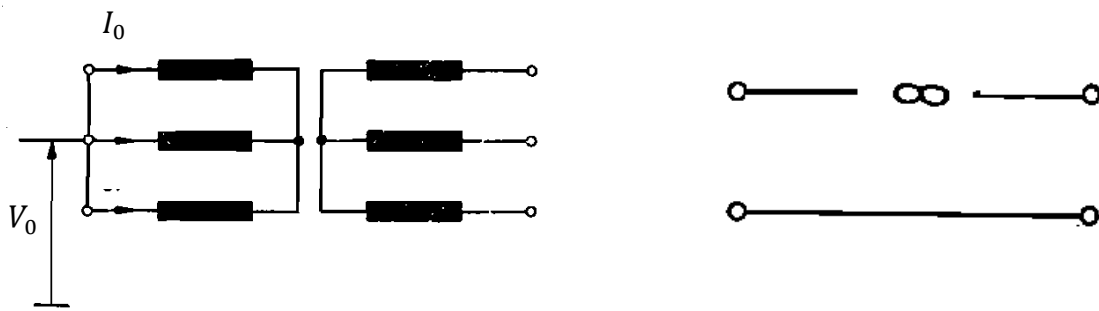
Kako bi olakšali proračun struja kratkog spoja, elemente u mreži prikazujemo nadomjesnim shemama koje se razlikuju za direktni, inverzni i nulti sustav. U nastavku će biti prikazane nadomjesne sheme dvonamotnih i tronamotnih transformatora, počevši od dvonamotnog transformatora.

Kao što je i prije navedeno, kako je direktna impedancija jednaka inverznoj impedanciji, tako će i njihove nadomjesne sheme biti jednake (slika 4.1.).

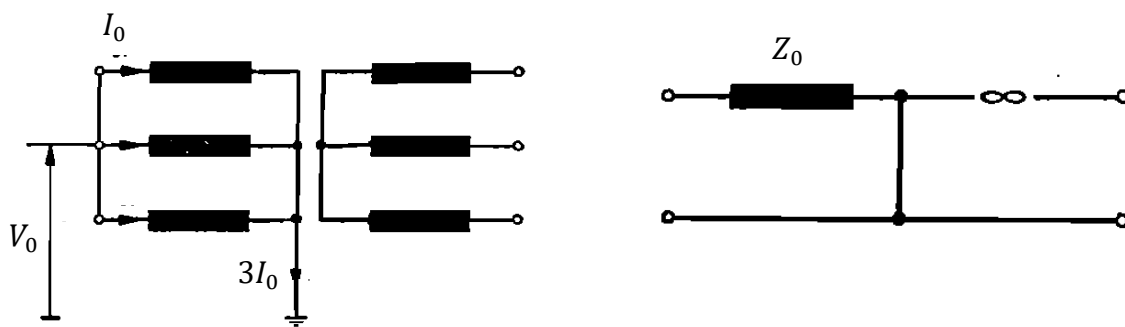


Slika 4.1. Nadomjesne sheme dvonamotnog transformatora u direktnom i inverznom sustavu [4]

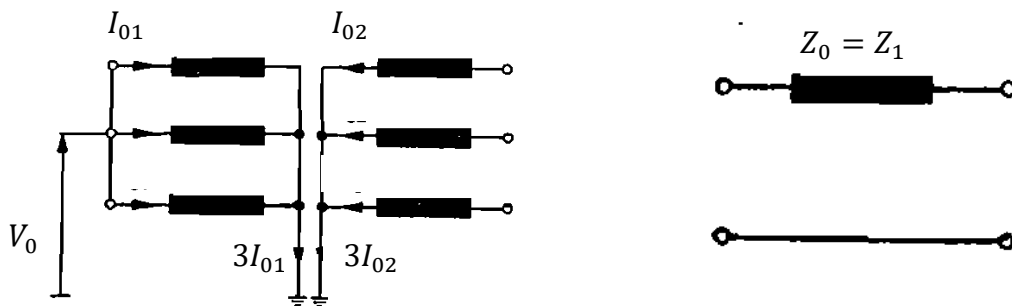
Kod nulte reaktancije uz prikaz nadomjesne sheme biti će prikazan i spoj transformatora, počevši od spoja zvijezda-zvijezda za slučajeve izoliranog zvjezdišta, direktnog uzemljenja i uzemljenja preko impedancije.



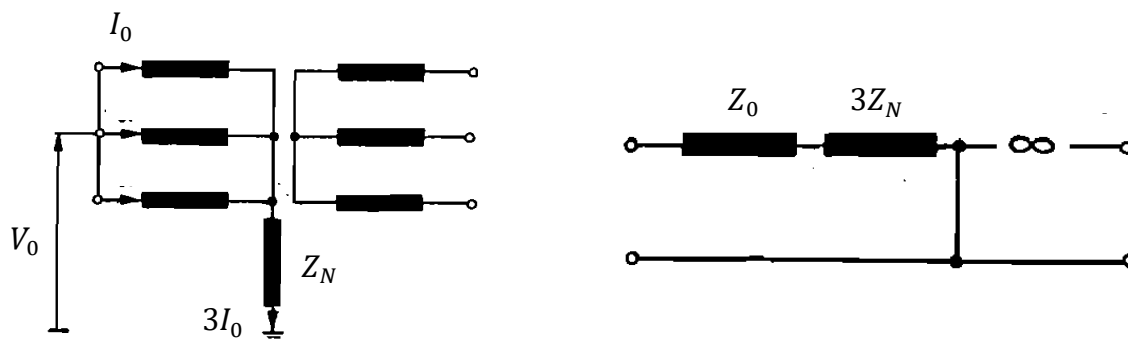
Slika 4.2. Nadomjesna shema spoja zvijezda-zvijezda s izoliranim zvjezditištima [4]



Slika 4.3. Nadomjesna shema spoja zvijezda-zvijezda s uzemljenim primarom [4]



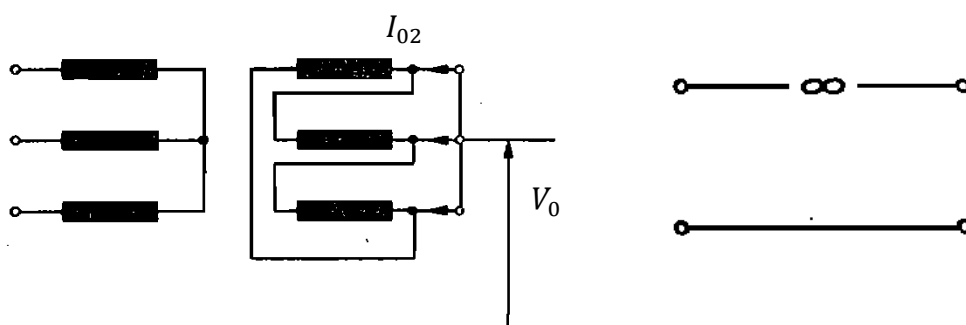
Slika 4.4. Nadomjesna shema spoja zvijezda-zvijezda s uzemljenim primarom i sekundarom [4]



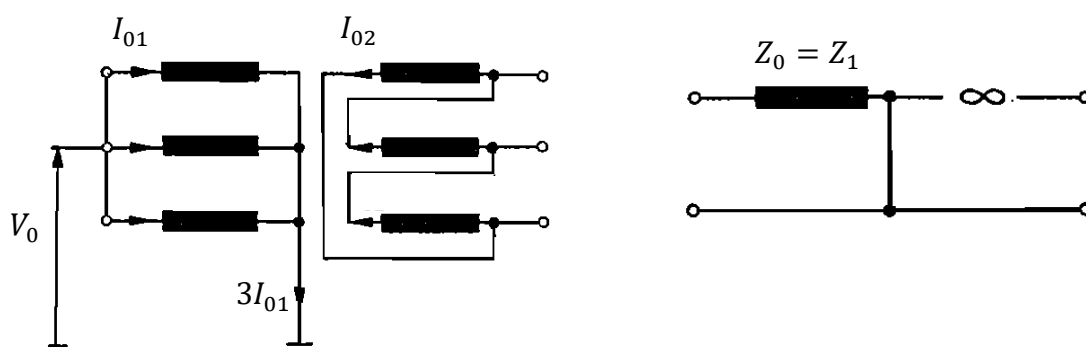
Slika 4.5. Nadomjesna shema spoja zvijezda-zvijezda s uzemljenjem primara preko impedancije

[4]

Sada će biti prikazane nadomjesne sheme nultog sustava u spoju zvijezda-trokut za slučajeve izoliranog zvjezdišta, direktnog uzemljenja i uzemljenja preko impedancije.

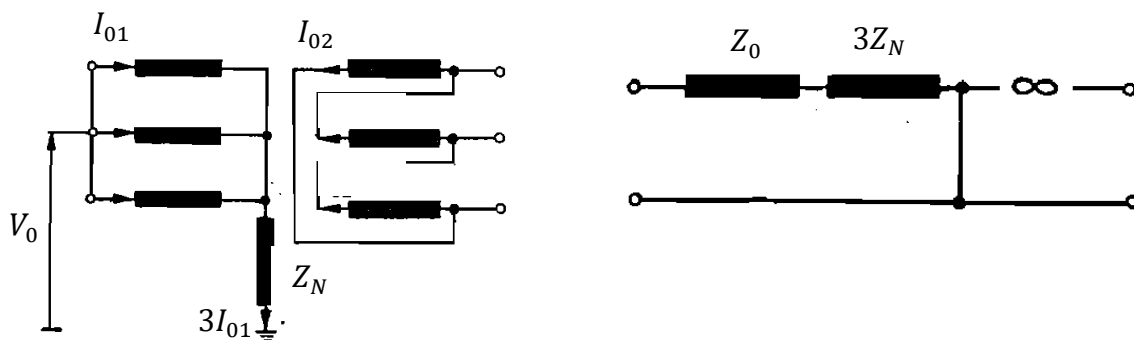


Slika 4.6. Nadomjesna shema spoja zvijezda-trokut s izoliranim zvjezdištem [4]



Slika 4.7. Nadomjesna shema spoja zvijezda-trokut s uzemljenim primarom [4]

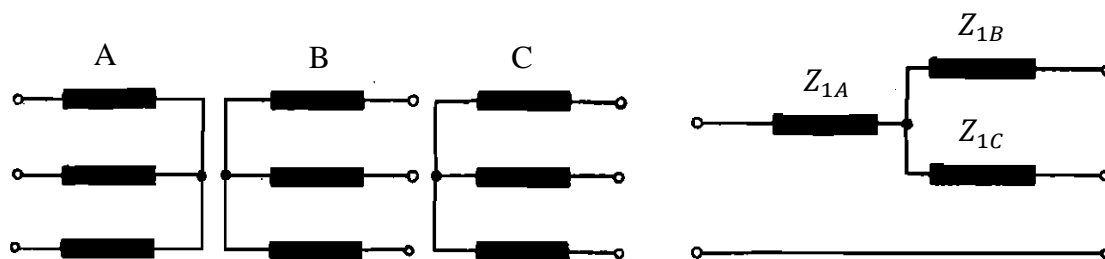




Slika 4.8. Nadomjesna shema spoja zvijezda-trokut s uzemljenjem primara preko impedancije [4]

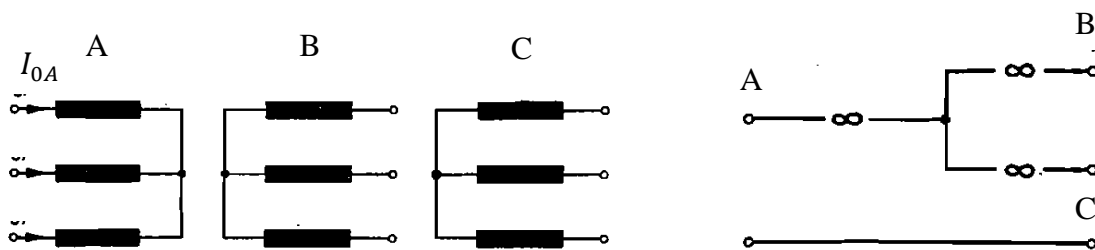
Impedancija nultog sustava dvonamotnog transformatora u spoju trokut-trokut je beskonačna te je njegova nadomjesna shema jednaka kao kod spoja zvijezda-zvijezda s izoliranim zvjezdima.

Za tronamotne transformatore vrijedi da su im direktna i inverzna impedancija jednake pa će im i nadomjesne sheme biti jednake (slika 4.9.).

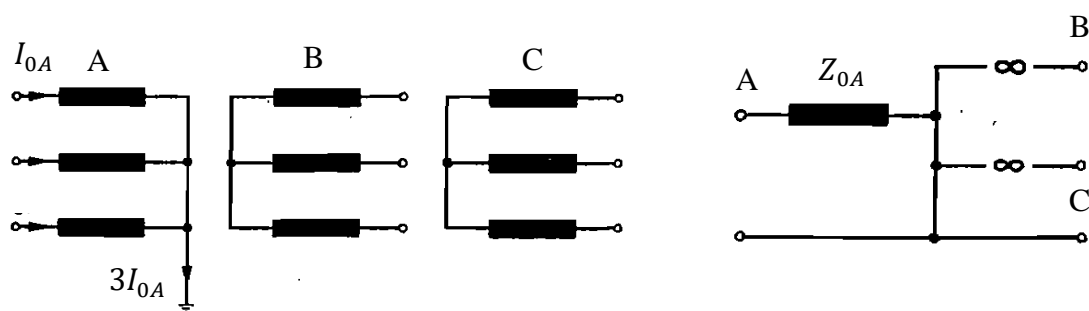


Slika 4.9. Nadomjesna shema tronamotnog transformatora u direktnom i inverznom sustavu [4]

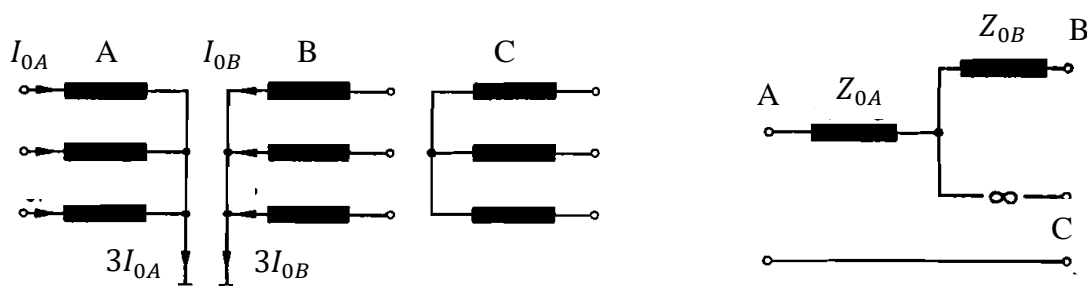
Nadomjesne sheme nultog sustava prikazane su po spojevima, počevši od spoja zvijezda-zvijezda-zvijezda.



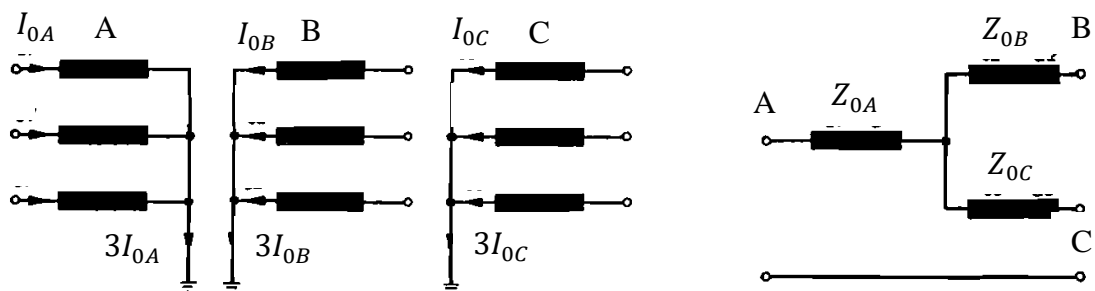
Slika 4.10. Nadomjesna shema spoja zvijezda-zvijezda-zvijezda s izoliranim zvjezdištima [4]



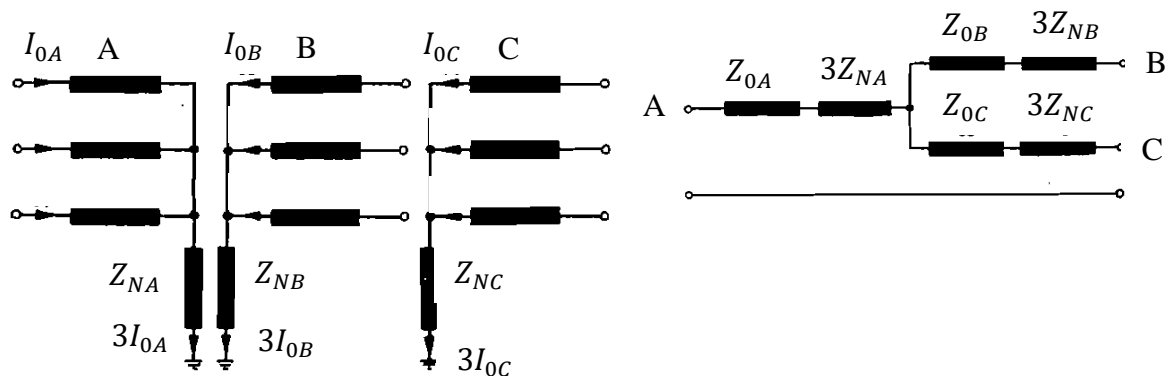
Slika 4.11. Nadomjesna shema spoja zvijezda-zvijezda-zvijezda s uzemljenim primarom [4]



Slika 4.12. Nadomjesna shema spoja zvijezda-zvijezda-zvijezda s uzemljenim primarom i sekundarom [4]

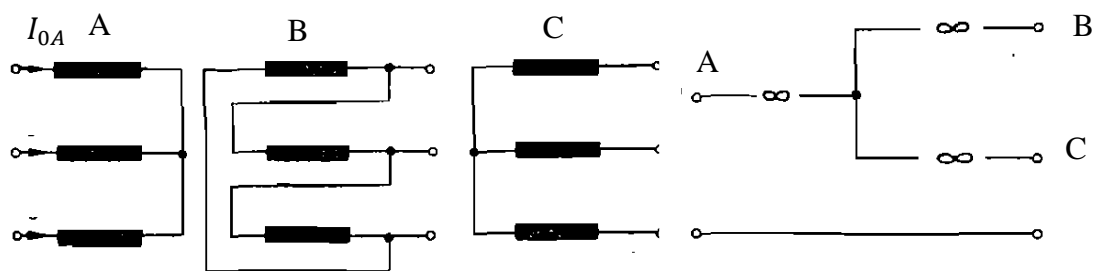


Slika 4.13. Nadomjesna shema spoja zvijezda-zvijezda-zvijezda s uzemljenim namotima [4]

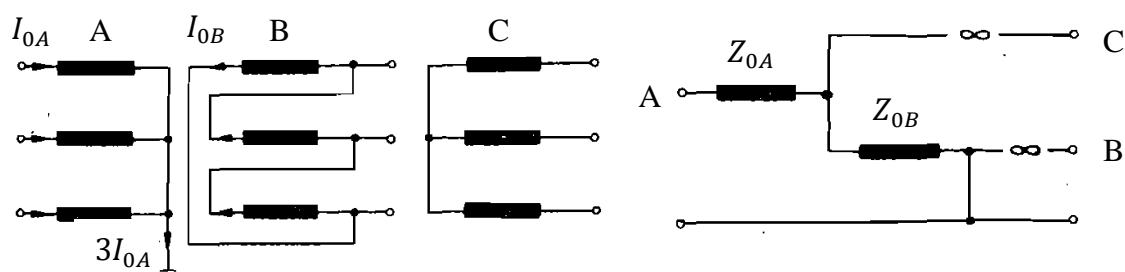


Slika 4.14. Nadomjesna shema spoja zvijezda-zvijezda-zvijezda s uzemljenjem preko impedancija [4]

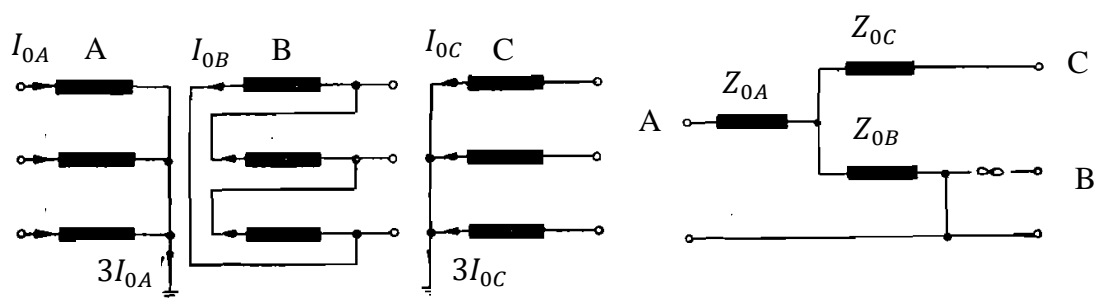
U nastavku prikazane su nadomjesne sheme za slučaj kada su dva namota spojena u zvijezdu, dok je treći u spoju trokut.



Slika 4.15. Nadomjesna shema spoja zvijezda-trokut-zvijezda s izoliranim zvjezdima [4]



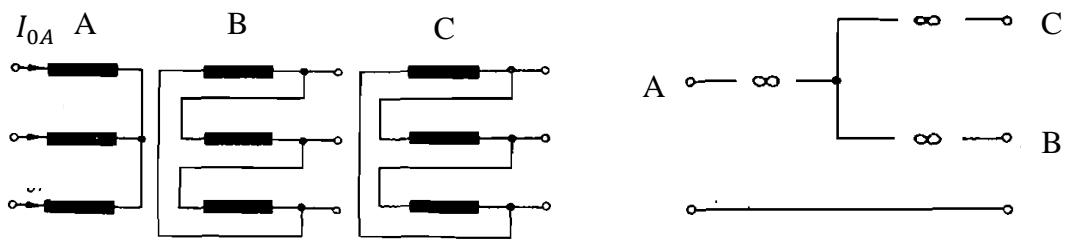
Slika 4.16. Nadomjesna shema spoja zvijezda-trokut-zvijezda s uzemljenim primarom [4]



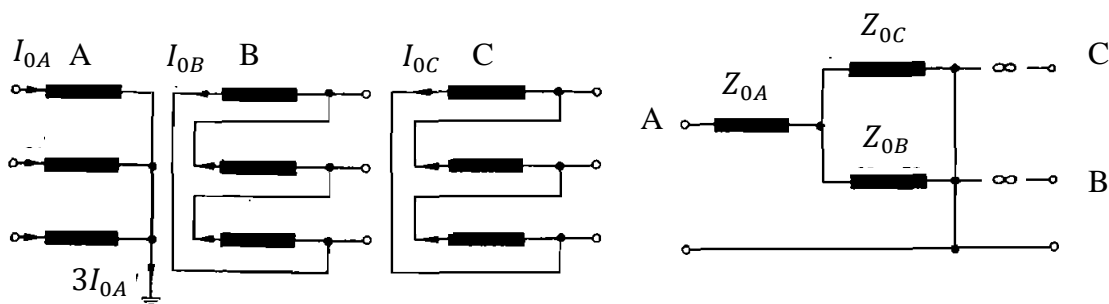
Slika 4.17. Nadomjesna shema spoja zvijezda-trokut-zvijezda s uzemljenim zvjezdima [4]

Kao i u prethodnim slučajevima kada je uzemljenje izvedeno preko impedancije  $Z_N$ , u nadomjesnoj shemi uzima se njezina trostruka vrijednost  $3Z_N$ .

Nadomjesne sheme za spoj zvijezda-trokut-trokut prikazane su na slikama 4.18. i 4.19..

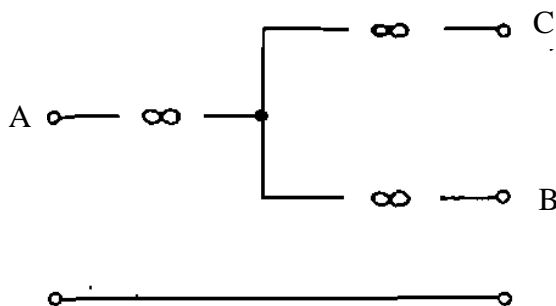


Slika 4.18. Nadomjesna shema spoja zvijezda-trokut-trokut s izoliranim zvjezdištem [4]



Slika 4.19. Nadomjesna shema spoja zvijezda-trokut-trokut s uzemljenim zvjezdištem [4]

Kada su sva tri namota u spoju trokut, impedancija nultog sustava beskonačno je velika, kao što je prikazano nadomjesnom shemom na slici 4.20..



Slika 4.20. Nadomjesna shema spoja trokut-trokut-trokut [4]

## 4.2. Sinkroni generatori

Prilikom izračuna početnih struja kratkog spoja u simetričnim sustavima koji su napajani direktno iz generatora bez prisustva transformatora (npr. industrijske mreže ili niskonaponske mreže), za impedanciju direktnog sustava koristi se izraz:

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (4.17)$$

Korekcijski faktor generatora  $K_G$  jednak:

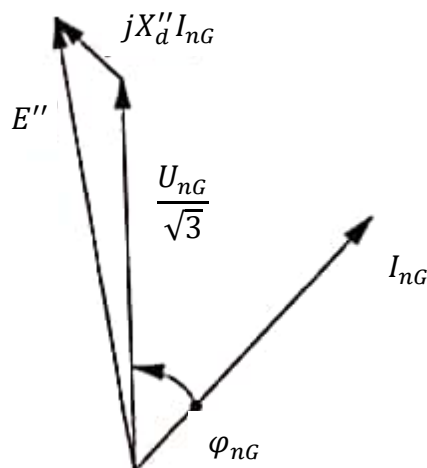
$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} \quad (4.18)$$

$$x_d'' = X_d'' \frac{S_{nG}}{U_{nG}^2} \quad (4.19)$$

gdje je:

- $U_n$  nazivni napon sustava,
- $U_{nG}$  nazivni napon generatora,
- $Z_{GK}$  korigirana početna impedancija generatora,
- $Z_G$  početna impedancija generatora direktnog sustava,
- $\varphi_{nG}$  fazni pomak između nazivne struje i faznog napona generatora,
- $x_d''$  relativna početna reaktancija generatora,
- $X_d''$  početna reaktancija generatora.

Prema normi IEC 60909, korekcijski faktor  $K_G$  služi za precizniji izračun impedancije generatora u početnom periodu kratkog spoja, a uvodi se zbog zamjene napona generatora u početnom periodu  $E''$  s ekvivalentnim naponskim izvorom  $cU_n/\sqrt{3}$ , kao što je prikazano na slici 4.1..



Slika 4.21. Fazni dijagram sinkronog generatora pri nazivnim uvjetima [1]

Nadalje, prilikom izračuna udarne struje radi veće preciznosti uvodi se fiktivna vrijednost otpora  $R_{Gf}$  iznosa:

$$R_{Gf} = 0,05 X_d'', \text{ za generatore s } U_{nG} > 1 \text{ kV i } S_{nG} \geq 100 \text{ MVA,}$$

$$R_{Gf} = 0,07 X_d'', \text{ za generatore s } U_{nG} > 1 \text{ kV i } S_{nG} < 100 \text{ MVA,}$$

$$R_{Gf} = 0,15 X_d'', \text{ za generatore s } U_{nG} \leq 1 \text{ kV.}$$

Različite vrijednosti otpora  $R_{Gf}$  u obzir uzimaju opadanje istosmjerne i izmjenične komponente struje kratkog spoja u prvoj poluperiodi nakon nastanka kratkog spoja.

Ukoliko je napon na stezaljkama generatora različit od njegovog nazivnog napona, potrebno je u izračun korekcijskog faktora  $K_G$  (jednadžba (4.18)) uvesti  $U_G = U_{nG}(1 + p_G)$  umjesto napona  $U_{nG}$ .

Impedancija sinkronog generatora u inverznom sustavu biti će jednaka impedanciji direktnog sustava kada je uzdužna reaktancija  $X_d''$  jednaka poprečnoj reaktanciji  $X_q''$ , što prikazuje sljedeći izraz:

$$Z_{2GK} = K_G(R_{2G} + jX_{2G}) = K_G Z_{2G} \approx K_G Z_G = K_G(R_G + jX_d'') \quad (4.20)$$

U slučaju kada su vrijednosti  $X_d''$  i  $X_q''$  različite, u proračun se uzima:

$$X_{2G} = \frac{x_d'' + x_q''}{2} \quad (4.21)$$

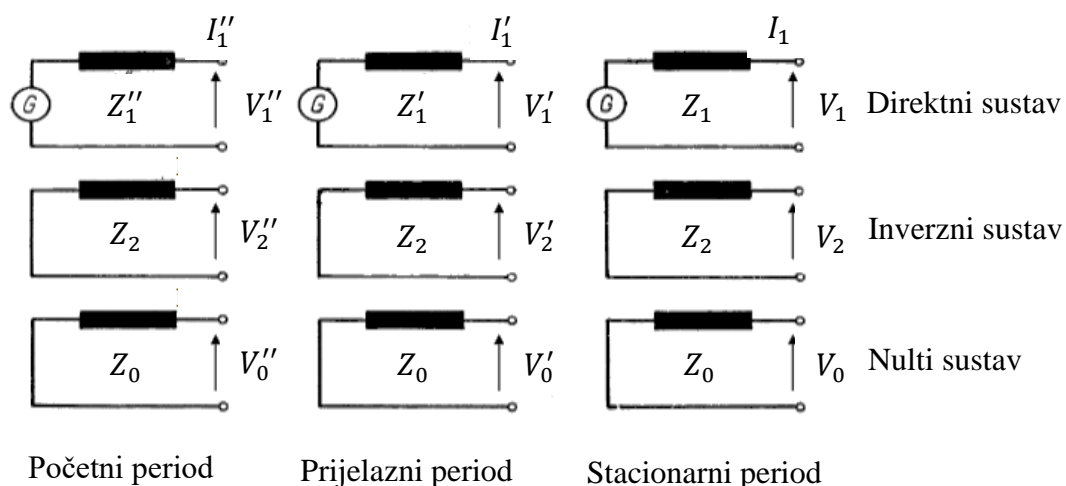
Impedancija sinkronog generatora u nultom sustavu računa se prema izrazu:

$$Z_{0GK} = K_G(R_{0G} + jX_{0G}) \quad (4.22)$$

Kada je zvjezdište generatora uzemljeno preko impedancije, na impedanciju se ne primjenjuje korekcijski faktor  $K_G$ .

#### 4.2.1. Nadomjesne sheme sinkronog generatora

Nadomjesne sheme direktnog, inverznog i nultog sustava za početni, prijelazni i stacionarni period kratkog spoja prikazane su na slici 4.2.. Treba napomenuti kako se vrijednosti impedancija inverznog i nultog sustava ne mijenjaju tijekom kratkog spoja. Isto tako vrijednost nulte impedancije ovisi o uzemljenju zvjezdišta generatora, odnosno ukoliko je zvjezdište izolirano, vrijednost impedancije je beskonačno velika.



Slika 4.22. Nadomjesne sheme sinkronog generatora [4]



### 4.3. Asinkroni motori

Asinkroni motori spadaju u skupinu aktivnih trošila. Oni za razliku od sinkronih motora, imaju uzбудu ovisnu o mreži, pa je njihov doprinos struji kratkog spoja najznačajniji u prvih nekoliko perioda trajanja kratkog spoja.

Srednjenaponski i niskonaponski motori pridonose početnoj struji kratkog spoja  $I_k''$ , udarnoj struji, rasklopnoj struji i stacionarnoj struji kod nesimetričnog kratkog spoja.

Doprinos asinkronih motora u niskonaponskim mrežama početnoj struji kratkog spoja može se zanemariti ako ne prelazi 5% iznosa struje kratkog spoja izračunate bez utjecaja motora:

$$\sum I_{nM} \leq 0,01 I_k'' \quad (4.23)$$

gdje je:

$\sum I_{nM}$  suma nazivnih struja motora direktno spojenih na mrežu,

$I_k''$  početna struja kratkog spoja bez utjecaja motora.

Srednjenaponske i niskonaponske motore moguće je zanemariti prilikom proračuna ukoliko nisu istovremeno stavljeni u pogon.

Impedancija asinkronog motora  $Z_M = R_M + jX_M$  u direktnom i inverznom sustavu računa se prema izrazu:

$$Z_M = \frac{1}{I_{PH}/I_{nM}} \cdot \frac{U_{nM}}{\sqrt{3}I_{nM}} = \frac{1}{I_{PH}/I_{nM}} \cdot \frac{U_{nM}^2}{S_{nM}} \quad (4.24)$$

gdje je:

$U_{nM}$  nazivni napon motora,

$I_{nM}$  nazivna struja motora,

$S_{nM}$  nazivna prividna snaga motora,

$I_{PH}/I_{nM}$  omjer struje praznog hoda i nazivne struje motora.

Ukoliko je omjer  $R_M/X_M$  poznat, tada se reaktancija  $X_M$  može računati prema izrazu:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1+(R_M/X_M)^2}} \quad (4.25)$$

S dovoljnom točnošću za omjer  $R_M/X_M$  mogu se koristiti relacije:

$R_M/X_M = 0,10$ , sa  $X_M = 0,995 Z_M$  za SN motore sa snagom po paru polova  $P_n \geq 1$  MW,

$R_M/X_M = 0,15$ , sa  $X_M = 0,989 Z_M$  za SN motore sa snagom po paru polova  $P_n < 1$  MW,

$R_M/X_M = 0,42$ , sa  $X_M = 0,922 Z_M$  za NN motore.

Sredjenaponski i niskonaponski motori koji su na mrežu spojeni preko dvonamotnih transformatora mogu se zanemariti ako vrijedi:

$$\frac{\sum P_{nM}}{\sum S_{nT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c \cdot 100 \sum S_{nT}}{\sqrt{3} U_n I_k''} - 0,3 \right|} \quad (4.26)$$

gdje je:

$\sum P_n$  suma nazivnih djelatnih snaga svih asinkronih motora,

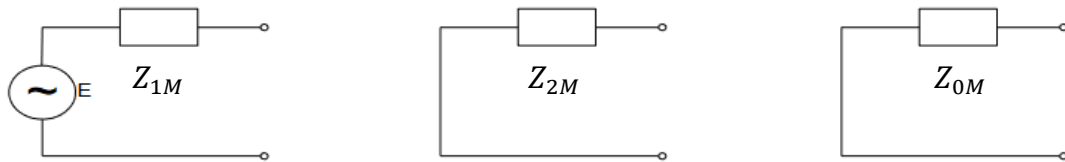
$\sum S_{nT}$  suma nazivnih prividnih snaga svih transformatora na koje su motori spojeni,

$I_k''$  početna struja kratkog spoja bez utjecaja asinkronih motora,

$U_n$  nazivni napon na sabirnicama spoja transformatora i mreže.

Prilikom proračuna početne struje kratkog spoja asinkroni motori u shemama se nadomještaju pripadnim impedancijama  $Z_M$  u direktnom i inverznom sustavu. Nulta impedancija asinkronih motora znatno je manja od direktne impedancije, a od značenja je samo u slučaju kada je nul-točka motora uzemljena, te je u tom slučaju dana od strane proizvođača.

Kada asinkroni motori nisu zanemareni prikazuje ih se nadomjesnim shemama kao na slici 4.23..



Slika 4.23. Nadomjesne sheme asinkronog motora za direktni, inverzni i nulti sustav [4]

#### 4.4. Aktivne mreže

Kako bi olakšali proračun kratkog spoja, odvajamo dio mreže u kojem je nastao kratki spoj od postojeće mreže koji se naziva aktivna mreža.

Kada je na mjestu nastanka trolejnog kratkog spoja koje je napajano od mreže poznata samo početna struja kratkog spoja  $I''_{kAM}$ , tada se impedancija aktivne mreže  $Z_{AM}$  u direktnom sustavu računa prema izrazu:

$$Z_{AM} = \frac{cU_{nAM}}{\sqrt{3}I''_{kAM}} \quad (4.27)$$

Ukoliko je omjer  $R_{AM}/X_{AM}$  poznat, reaktancija  $X_{AM}$  računa se prema izrazu:

$$X_{AM} = \frac{Z_{AM}}{\sqrt{1+(R_{AM}/X_{AM})^2}} \quad (4.28)$$

Nadalje, ako je mjesto kratkog spoja napajano od sredjenaponske ili visokonaponske mreže preko transformatora, a poznata je samo početna struja kratkog spoja  $I''_{kAM}$  tada direktnu impedanciju aktivne mreže  $Z_{AMt}$  s referentnom niskonaponskom stranom transformatora računamo prema izrazu:

$$Z_{AMt} = \frac{cU_{nAM}}{\sqrt{3}I''_{kAM}} \cdot \frac{1}{t_n^2} \quad (4.29)$$

gdje je:

$U_{nAM}$  nazivni napon sustava na spoju s aktivnom mrežom,

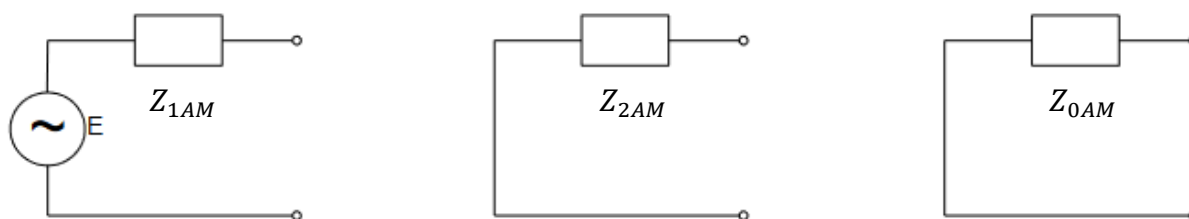
$I''_{kAM}$  početna struja kratkog spoja na spoju s aktivnom mrežom,

$c$  faktor predopterećenja,

$t_n$  nazivni transformacijski omjer.

U slučaju visokonaponskih aktivnih mreža s nazivnim naponom većim od 35 kV napajanih preko nadzemnih vodova, impedanciju  $Z_{AM}$  moguće je u većini slučajeva zamijeniti reaktancijom  $X_{AM}$ . U ostalim slučajevima kada nije poznata točna vrijednost otpora aktivne mreže  $R_{AM}$  može se uzeti da vrijedi  $R_{AM} = 0,1X_{AM}$  gdje je  $X_{AM} = 0,995Z_{AM}$ .

Impedancija aktivne mreže u inverznom sustavu jednaka je direktnoj impedanciji. Impedanciju aktivne mreže u nultom sustavu uzima se u obzir ovisno o konfiguraciji namota i uzemljenju zvjezdista transformatora. Na slici 4.24. prikazane su nadomjesne sheme impedancija aktivne mreže.



Slika 4.24. Nadomjesne sheme aktivne mreže za direktni, inverzni i nulti sustav [4]

#### 4.5. Nadzemni vodovi

Direktna impedancija vodova  $Z_L = R_L + jX_L$  ovisi o presjeku i geometrijskom rasporedu vodiča. Na visokonaponskim i srednjenaponskim razinama moguće je zanemariti radne otpore te su tada direktna i inverzna reaktancija jednake. Nulta reaktancija osim o presjeku i geometrijskom rasporedu vodiča, ovisi i o prisutnosti zaštitnog užeta i vodljivosti tla.

Djelatni otpor po jedinici dužine  $R'_L$  pri temperaturi vodiča od 20 °C može se izračunati pomoću nazivnog presjeka vodiča  $q_n$  i specifičnog otpora  $\rho$ :

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (4.30)$$

Za vrijednosti otpora  $\rho$  mogu se uzeti vrijednosti:

bakar  $\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega mm^2}{m}$

aluminij  $\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega mm^2}{m}$

alumijska legura  $\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega mm^2}{m}$

Reaktancija po jedinici dužine  $X'_L$  nadzemnih vodova može se izračunati prema izrazu:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1}{4\pi} + \ln \frac{d}{r} \right) = f \mu_0 \left( \frac{1}{4\pi} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (4.31)$$

gdje je:

$d = \sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L2L3}d_{L3L1}}$  srednja geometrijska udaljenost između vodiča ili središta snopova,

$r$  polumjer jednog vodiča, u slučaju snopova  $r$  treba zamijeniti s

$$r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}, \text{ gdje je } R \text{ polumjer snopa vodiča,}$$

$n$  broj vodiča u snopu, gdje je za jedan vodič  $n = 1$ ,

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m.}$$

#### 4.6. Prigušnice

Prigušnice su elementi koji služe za smanjenje struja kratkog spoja. Izvode se kao svitci bez željeza, a spajaju se u seriju s trošilima tako da se u svakoj fazi nalazi po jedna prigušnica koja je odvojena od druge dvije.

Impedancije prigušnice jednake su za direktni, inverzni i nulti sustav. Djelatni otpor prigušnice puno je manji od njezine reaktancije pa se impedancija može računati prema izrazu:

$$Z_P = \frac{u_{kP}}{100\% \sqrt{3} I_{nP}} \frac{U_n}{I_{nP}} \quad (4.32)$$

gdje je:

- $u_{kP}$  relativna vrijednost napona prigušnice za vrijeme trajanja kratkog spoja,
- $I_{nP}$  nazivna struja prigušnice,
- $U_n$  nazivni napon na mjestu kratkog spoja.

#### 4.7. Statički pretvarači

Statički pretvarači su električni sklopovi koji se uglavnom sastoje od poluvodičkih uređaja koji u načinu rada prekidača (sklopke) omogućuju, kroz pravilan sekvencijski rad, prijenos energije između generatora i tereta različitih električnih karakteristika.

Statički pretvarači uzimaju se u proračun struja kratkog spoja samo za slučaj trolnog kratkog spoja, ako rotacijske mase motora i statičke opreme omogućuju obrnuti prijenos energije za usporavanje za vrijeme kratkog spoja. Tada oni doprinose početnoj i udarnoj struji kratkog spoja. Kao rezultat toga, u proračunu kratkog spoja statičke pretvarače promatra se na sličan način kao asinkrone motore te se primjenjuje sljedeće:

$Z_M$  impedancija prema jednadžbi (4.24),

$U_{nM}$  nazivni napon transformatora statičkog pretvarača na strani mreže ili nazivni napon statičkog pretvarača, ako transformator nije prisutan,

$I_{nM}$  nazivna struja transformatora statičkog pretvarača na strani mreže ili nazivna struja statičkog pretvarača, ako transformator nije prisutan,

$$I_{PH}/I_{nM} = 3,$$

$$R_M/X_M = 0,10 \text{ za } X_M = 0,995 Z_M.$$

Sve ostale vrste statičkih pretvarača zanemaruju se u proračunu struja kratkog spoja prema normi IEC 60909.

#### **4.8. Kondenzatori i nerotirajući tereti**

Kapacitivnost vodova, paralelne admitancije i nerotirajući tereti uzimaju se u obzir samo u nultom sustavu.

Bez obzira na vrijeme nastanka kratkog spoja, struja pražnjenja kondenzatora može se zanemariti u proračunu udarne struje kratkog spoja.

Učinak serijskih kondenzatora može se zanemariti samo ako su paralelno spojeni s uređajima za ograničenje napona.

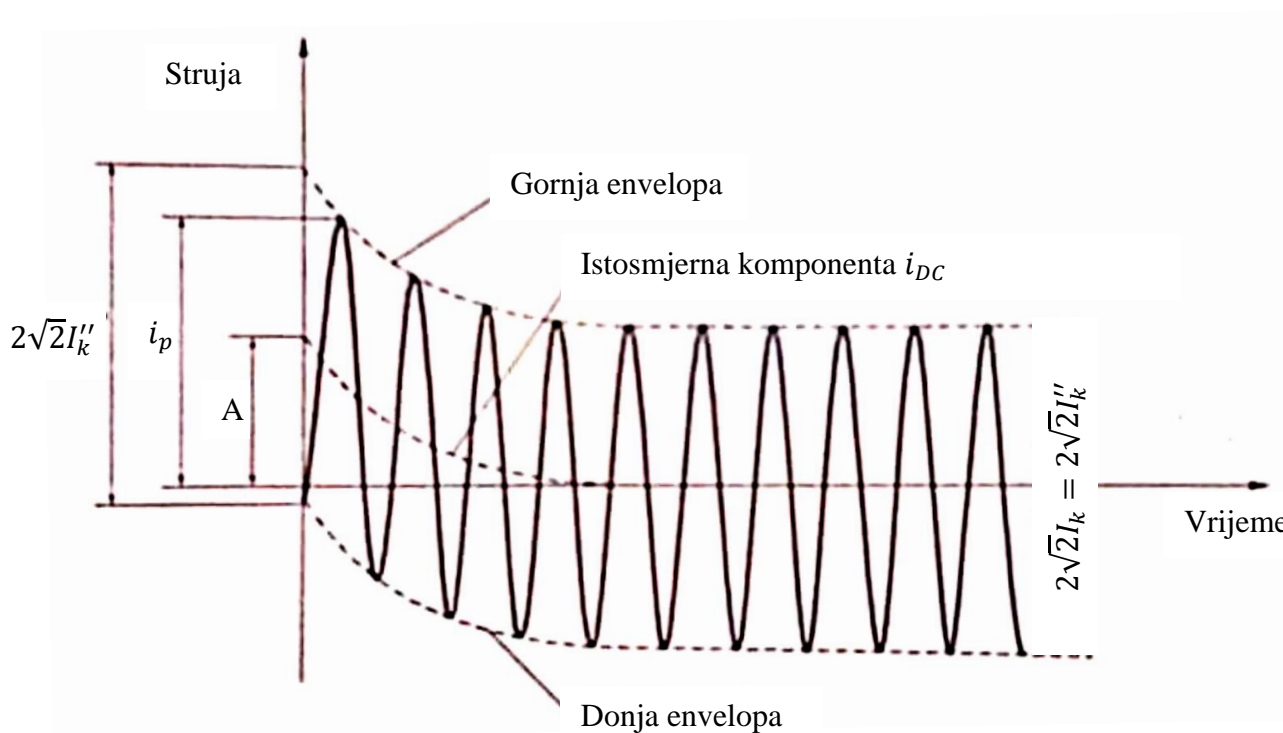
U slučaju visokonaponskih istosmjernih prijenosnih sustava, kondenzatorske baterije i filtri zahtijevaju posebno razmatranje kod proračuna izmjeničnih struja kratkog spoja.

## 5. STRUJE KRATKOG SPOJA

Kod kratkog spoja nastalog daleko od generatora, struja kratkog spoja može se smatrati sumom:

- izmjenične komponente s konstantnom amplitudom za vrijeme trajanja kratkog spoja i
- istosmjernje komponente s početnom vrijednosti  $A$  koja postepeno opada na nulu.

Slika 5.1. prikazuje tijek struje u slučaju kratkog spoja daleko od generatora. Prikazane su efektivne vrijednosti početne, rasklopne i stacionarne struje kratkog spoja sličnih magnituda.



Slika 5.1. Struja kratkog spoja s konstantnom izmjeničnom komponentom [1]

Za slučaj kratkog spoja nastalog blizu generatora, struja kratkog spoja jednaka je sumi:

- izmjenične komponente opadajuće amplitude za vrijeme kratkog spoja
- istosmjernje komponente početne vrijednosti  $A$  koja postepeno opada na nulu

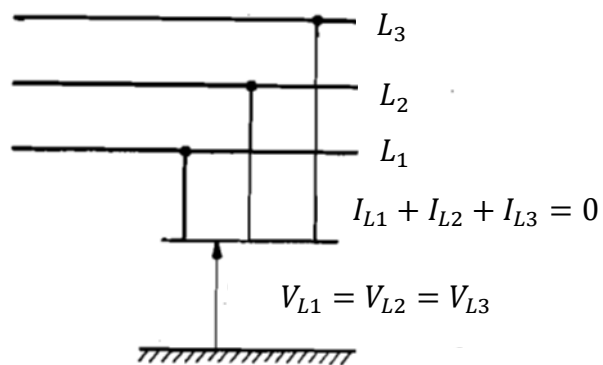
Prijašnji slučaj već je prije prikazan slikom 3.1..



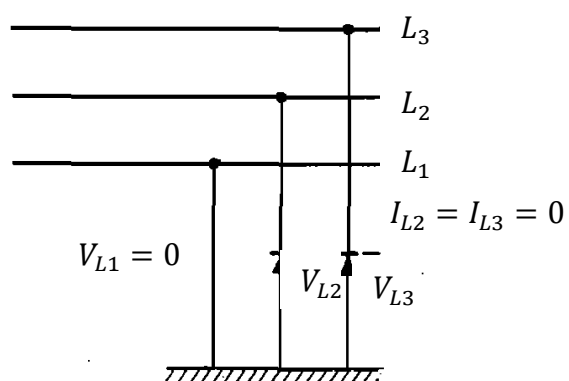
U proračunu struja kratkog spoja za sustave koje napajaju generatori, elektrane i motori od interesa je poznavati ne samo početnu i udarnu struju kratkog spoja, već i rasklopnu struju te stacionarnu struju kratkog spoja.

### 5.1. Vrste kratkih spojeva

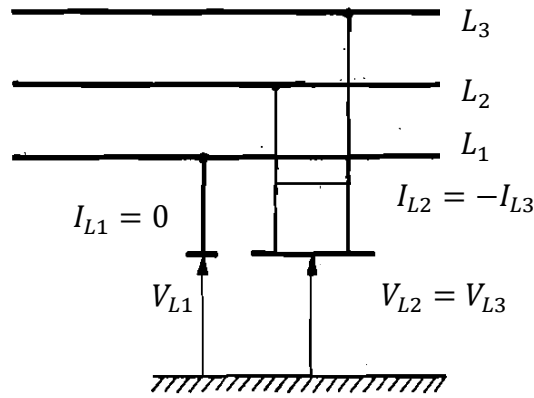
U trofaznim mrežama postoje četiri vrste kratkih spojeva: trolezni kratki spoj, jednopolni kratki spoj, dvopolni kratki spoj i dvopolni kratki spoj sa zemljom. Jednopolni i dvopolni kratki spoj sa zemljom imaju značenje kratkoga spoja samo ako je nul-točka uzemljena jer se inače pojavljuju jako male kapacitivne struje. U nastavku prikazane su sheme spomenutih kratkih spojeva.



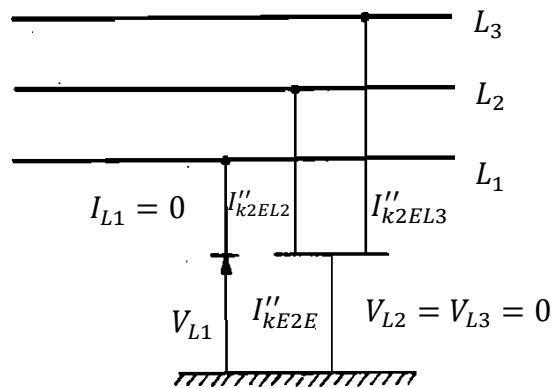
Slika 5.2. Trolezni kratki spoj [4]



Slika 5.3. Jednopolni kratki spoj [4]



Slika 5.4. Dvopolni kratki spoj [4]



Slika 5.5. Dvopolni kratki spoj sa zemljom [4]

## 5.2. Početna struja kratkog spoja

U većini slučajeva impedancija nultog sustava veća je od direktne ili inverzne impedancije, što će rezultirati najvećom početnom strujom kratkog spoja u slučaju trolnog kratkog spoja. Izuzetak mogu biti kratki spojevi u blizini transformatora kada direktna impedancija može biti veća od nulte impedancije. U tom slučaju najveća početna struja kratkog spoja javit će se za dvopolni kratki spoj sa zemljom.

### 5.2.1. Trofazni kratki spoj

Kod trofaznog kratkog spoja, početnu struju kratkog spoja  $I''_k$  računamo pomoću ekvivalentnog naponskog izvora  $cU_n/\sqrt{3}$  na mjestu kratkog spoja i impedancije kratkog spoja  $Z_k = R_k + jX_k$ :

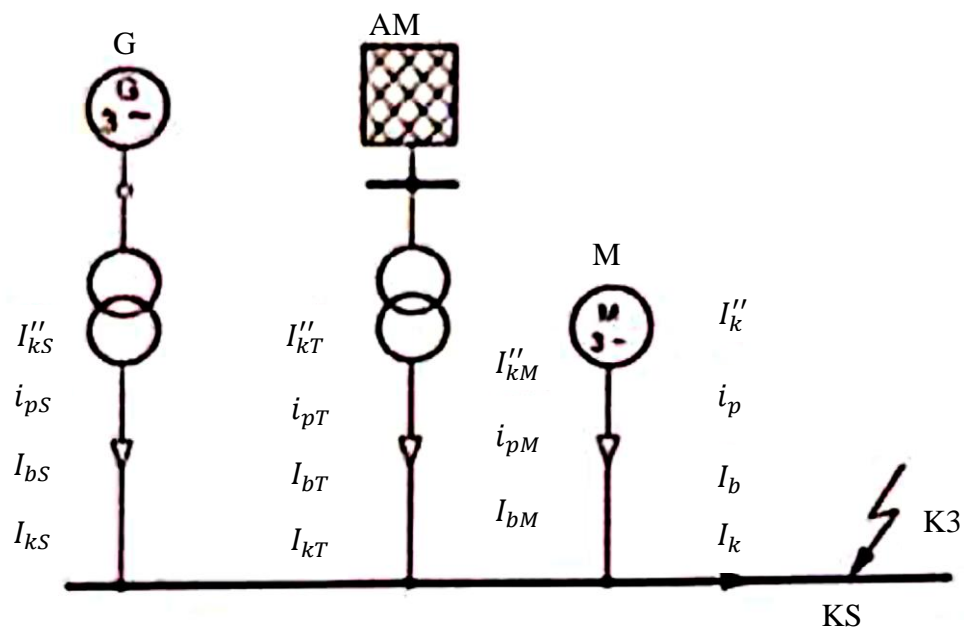
$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (5.1)$$

Ekvivalentni naponski izvor  $cU_n/\sqrt{3}$  zajedno s odgovarajućim faktorom predopterećenja  $c$  treba uvesti prema metodi iz norme IEC 60909, opisane u trećem poglavlju ovog rada.

Gornja jednačba koristi se i za trofazni kratki spoj nastao daleko od generatora, napajan od jednog izvora.

Kada mjesto kratkog spoja napaja više izvora, a ne radi se o petljastoj strukturi mreže (slika 5.6.), početna struja kratkog spoja jednaka je vektorskoj sumi struja pojedinih grana mreže (5.2), no i korištenje apsolutnih vrijednosti dati će rezultat zadovoljavajuće točnosti.

$$I''_k = \sum_i I''_{ki} \quad (5.2)$$



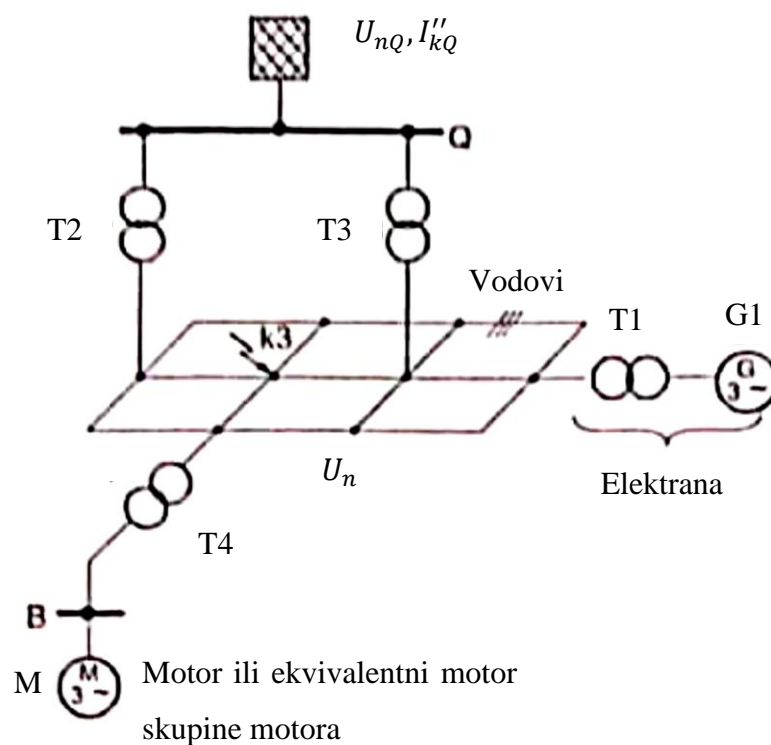
Slika 5.6. Primjer mreže ne-petljastog oblika [3]

Svaku struju pojedine grane moguće je izračunati kao samostalnu struju troleznog kratkog spoja napajanu iz jednog izvora prema jednačbi (5.1).

Nadalje, za mreže petljaste strukture potrebno je odrediti impedanciju kratkog spoja redukcijom mreže koristeći direktne impedancije elemenata u mreži.

Impedancije elemenata koji su povezani preko transformatora na mrežu u kojoj je došlo do kratkog spoja, moraju se prebaciti na jedan bazni napon tako da ih se pomnoži kvadratom nazivnog transformacijskog omjera. Ukoliko ima više transformatora s blago različitim transformacijskim omjerima, može se koristiti njihova aritmetička sredina.

Početna struja kratkog spoja u petljastim mrežama računa se prema izrazu (5.1).



Slika 5.7. Primjer petljaste mreže napajane iz više izvora [3]

### 5.2.2. Dvopolni kratki spoj

Početna struja za slučaj dvopolnog kratkog spoja računa se prema izrazu:

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{|Z_1+Z_2|} = \frac{cU_n}{2|Z_1|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_k \quad (5.3)$$

Za vrijeme početnog perioda kratkog spoja, inverzna impedancija približno je jednaka direktnoj impedanciji neovisno o blizini generatora i mjesta nastanka kratkog spoja, što omogućava da se u gornju jednadžbu uvrsti  $Z_2 = Z_1$ .

Inverzna impedancija različita je od direktne jedino za vrijeme prijelaznog i stacionarnog perioda kratkog spoja nastalog u blizini generatora.

### 5.2.3. Dvopolni kratki spoj sa zemljom

Kako bi izračunali početnu struju dvopolnog kratkog spoja sa zemljom potrebno je razlikovati dvije fazne struje ( $I''_{k2EL2}$  i  $I''_{k2EL3}$ ) koje teku u fazama koje su kratko spojene, od struje  $I''_{kE2E}$  koja teče prema zemlji i jednaka je zbroju dviju faznih struja (slika 5.5.).

Za kratke spojeve daleko od generatora inverzna impedancija je približno jednaka direktnoj impedanciji, a ako je uz to i nulta impedancija manja od inverzne, najveću vrijednost imati će struja  $I''_{kE2E}$ .

Struje  $I''_{k2EL2}$  i  $I''_{k2EL3}$  računaju se prema sljedećim izrazima:

$$I''_{k2EL2} = -jcU_n \frac{Z_0 - aZ_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0} \quad (5.4)$$

$$I''_{k2EL3} = jcU_n \frac{Z_0 - a^2Z_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0} \quad (5.5)$$

Struju  $I''_{kE2E}$  možemo izračunati prema izrazu:

$$I''_{kE2E} = -\frac{\sqrt{3}cU_nZ_2}{Z_1Z_2 + Z_1Z_0 + Z_2Z_0} \quad (5.6)$$

Za slučaj kratkog spoja nastalog daleko od generatora s  $Z_2 = Z_1$ , gornje jednadžbe se pojednostavljaju, pa vrijedi:

$$I''_{k2EL2} = cU_n \frac{|Z_0/Z_1 - a|}{|Z_1 + 2Z_0|} \quad (5.7)$$

$$I''_{k2EL2} = cU_n \frac{|Z_0/Z_1 - a^2|}{|Z_1 + 2Z_0|} \quad (5.8)$$

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|Z_1 + 2Z_0|} \quad (5.9)$$

#### 5.2.4. Jednopolni kratki spoj

Početna struja jednopolnog kratkog spoja  $I''_{k1}$  računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (5.10)$$

U slučaju kratkog spoja nastalog daleko od generatora za koji vrijedi  $Z_2 = Z_1$ , struja  $I''_{k1}$  jednaka je:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2Z_1 + Z_0|} \quad (5.11)$$

Kada je nulta impedancija manja od direktne, odnosno inverzne impedancije, početna struja jednopolnog kratkog spoja  $I''_{k1}$  veća je od početne struje trolnog kratkog spoja  $I''_k$ , ali manja od početne struje dvopolnog kratkog spoja s zemljom  $I''_{kE2E}$ . Struja  $I''_{k1}$  biti će najveća kada vrijedi:  $1,0 > Z_0/Z_1 > 0,23$ .

### 5.3. Udarne struja kratkog spoja

Udarne struja je maksimalna vrijednost struje kratkog spoja od trenutka njenog nastanka. Poznavanje udarne struje potrebno je kako bi se odredila maksimalna dinamička naprezanja elemenata mreže za vrijeme trajanja kratkog spoja.

### 5.3.1. Tropolni kratki spoj

Za slučaj tropolnog kratkog spoja nastalog u mreži koja nije petljaste strukture (slika 5.6.), doprinos pojedine grane udarnoj struji  $i_p$  može se izraziti kao:

$$i_p = k\sqrt{2} I_k'' \quad (5.12)$$

gdje je:

$k$  faktor opadanja istosmjerne komponente struje kratkog spoja.

Faktor  $k$  ovisan je o omjeru  $R/X$  impedancije kratkog spoja te se računa pomoću izraza:

$$k = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (5.13)$$

Gornje jednadžbe za pretpostavku uzimaju da kratki spoj nastaje kada je u jednoj fazi inducirani napon jednak nuli te da se udarna struja javlja nakon polovine periode od nastanka kratkog spoja.

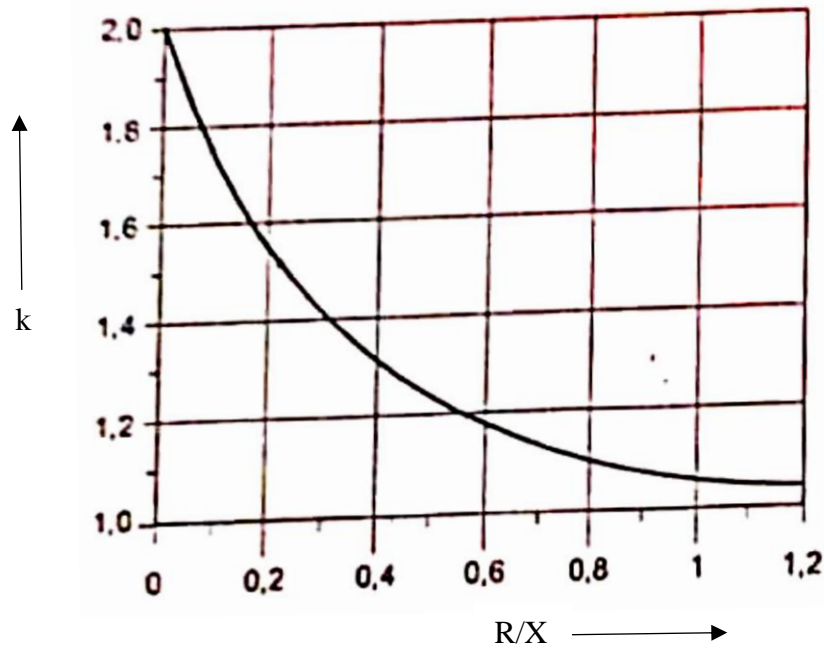
Ukupna udarna struja na mjestu kratkog spoja napajana iz više grana računa se prema izrazu:

$$i_p = \sum_i i_{pi} \quad (5.14)$$

Kod izračuna udarne struje u mreži petljastog oblika, faktor  $k$  računa se prema jednoj od sljedećih metoda:

#### a) Uniformni omjer $R/X$

Faktor  $k$  određuje se prema slici 5.8. na način da se odabire najmanja vrijednost omjera  $R/X$  od svih grana mreže. U obzir se uzimaju samo grane kroz koje teku parcijalne struje kratkog spoja pri nazivnom naponu i grane s transformatorima susjedne mjestu kratkog spoja.



Slika 5.8. Faktor  $k$  [2]

b) Omjer  $R/X$  na mjestu kratkog spoja

Faktor  $k$  množi se s 1,15 kako bi se uklonile netočnosti korištenjem omjera  $R_k/X_k$  u mreži s kompleksnim impedancijama.

$$i_{pb} = 1,15k_b\sqrt{2} I_k'' \quad (5.15)$$

Dokle god je omjer  $R/X$  manji od 0,3 u svim granama nije potrebno faktor  $k$  pomnožiti s 1,15. Faktor  $k_b$  određuje se prema grafu na slici 5.8. iz omjera  $R_k/X_k$  danog impedancijom  $Z_k = R_k + jX_k$  na mjestu nastanka kratkog spoja za frekvenciju 50 ili 60 Hz.

c) Ekvivalentna frekvencija  $f_c$

Ekvivalentna impedancija sustava  $Z_c$  promatrana s mjesta nastanka kratkog spoja računa se s pretpostavkom da vrijedi  $f_c = 20 \text{ Hz}$  (za nazivnu frekvenciju 50 Hz) ili  $f_c = 24 \text{ Hz}$  (za nazivnu frekvenciju 60 Hz). Omjer  $R/X$  računa se prema izrazu:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} \quad (5.16)$$

gdje je:

$$Z_c = R_c + jX_c \text{ ekvivalentna impedancija sustava s frekvencijom } f_c,$$



$R_c$  realni dio impedancije  $Z_c$ ,

$X_c$  imaginarni dio impedancije  $Z_c$ .

Faktor  $k$  dobiva se korištenjem omjera  $R/X$  iz gornjeg izraza i slike 5.8. ili korištenjem izraza (5.13). Ova metoda preporuča se za mreže petljaste strukture uz korištenje korekcijskih faktora za transformatore, generatore i elektrane.

### 5.3.2. Dvopolni kratki spoj

Udarne struja dvopolnog kratkog spoja računa se sljedećim izrazom:

$$i_{p2} = k\sqrt{2} I''_{k2} \quad (5.17)$$

Kako bi se pojednostavio proračun, norma IEC 60909 dopušta korištenje vrijednosti faktora  $k$  izračunatog za trolni kratki spoj.

Kada vrijedi  $Z_2 = Z_1$ , udarna struja dvopolnog kratkog spoja manja je od udarne struje trolnog kratkog spoja, što pokazuje i sljedeći izraz:

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_p \quad (5.18)$$

### 5.3.3. Dvopolni kratki spoj sa zemljom

Udarne struja dvopolnog kratkog spoja s zemljom jednaka je:

$$i_{p2E} = k\sqrt{2} I''_{k2E} \quad (5.19)$$

Za vrijednost faktora  $k$  dozvoljeno je uzeti vrijednosti za trolni kratki spoj. Struju  $i_{p2E}$  potrebno je računati samo u slučaju kada je nulta impedancija sustava manja od 1/4 direktne impedancije.

### 5.3.4. Jednopolni kratki spoj

U slučaju jednopolnog kratkog spoja, udarna struja računa se prema izrazu:

$$i_{p1} = k\sqrt{2} I''_{k1} \quad (5.20)$$

Kao i u prijašnjim slučajevima, za faktor  $k$  može se uzeti vrijednost izračunata za trolezni kratki spoj prema jednadžbi (5.13).

## 5.4. Istosmjerna komponenta struje kratkog spoja

Maksimalnu vrijednost istosmjerne komponente struje kratkog spoja, s dovoljnom točnošću daje jednadžba:

$$i_{DC} = \sqrt{2} I''_k e^{-2\pi f t \frac{R}{X}} \quad (5.21)$$

gdje je:

$I''_k$  početna struja kratkog spoja,

$f$  nazivna frekvencija,

$t$  vrijeme,

$R/X$  omjer realnog i imaginarnog dijela impedancije.

U slučaju petljastih mreža, omjer  $R/X$  računa se prema prije spomenutoj metodi ekvivalentne frekvencije. Ovisno o umnošku frekvencije i vremena, frekvencija  $f_c$  računa se prema tablici 5.1..

Tablica 5.1. Ekvivalentna frekvencija  $f_c$  [1]

$f \cdot t$	<1	<2,5	<5	<12,5
$f_c/f$	0,27	0,15	0,092	0,055

## 5.5. Rasklopna struja kratkog spoja

Rasklopna struja je efektivna vrijednost struje kratkog spoja koja protječe kroz prekidač u trenutku odvajanja njegovih kontakata. Sastoji se od izmjenične i istosmjerne komponente struje kratkog spoja.

Za kratki spoj udaljen od generatora, rasklopna struja odgovara izmjeničnoj komponenti najnepovoljnije vrste početne struje kratkog spoja:

$$I_b = I_k'' \quad (5.22)$$

U slučaju kratkog spoja u blizini generatora za mreže napajane od strane jednog izvora ili nepetljaste strukture u izraz se uvodi faktor  $\mu$ :

$$I_b = \mu I_k'' \quad (5.23)$$

Faktor  $\mu$  u obzir uzima prigušenje izmjenične komponente od trenutka njenog nastanka do odvajanja kontakata prekidača. Faktor  $\mu$  ovisi o minimalnom vremenu prigušenja i omjeru  $I_{kG}''/I_{nG}$ . Ukoliko omjer  $I_{kG}''/I_{nG}$  nije veći od 2, koristi se vrijednost  $\mu = 1$  neovisno o vremenu prigušenja.

U slučaju trolejnog kratkog spoja u mrežama koje nisu petljaste strukture, rasklopna struja jednaka je sumi rasklopnih struja pojedinih grana mreže:

$$I_b = \sum_i I_{bi} \quad (5.24)$$

Kod mreža petljaste strukture najprije se računa rasklopna struja na mjestu kratkog spoja, a zatim se računaju parcijalne struje u granama gdje su smješteni prekidači. Rasklopna struja u ovom slučaju jednaka je:

$$I_b = I_k'' \quad (5.25)$$

## 5.6. Struja mjerodavna za ugrijavanje

Struja mjerodavna za ugrijavanje je efektivna vrijednost struje kratkog spoja u vremenu od nastanka do trenutka prekida kratkog spoja. Izraz za njezin proračun dobiva se iz Jouleovog integrala koji prikazuje koliko energije stvara struja kratkog spoja na otporu elemenata mreže.

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k''^2 (m + n) T_k = I_{th}^2 T_k \quad (5.26)$$

Iz prijašnje jednadžbe slijedi izraz za struju mjerodavnu za ugrijavanje:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (5.27)$$

gdje je:

- $I_k''$  početna struja troleznog kratkog spoja,
- $m$  vremenska ovisnost toplinskog efekta istosmjerne komponente,
- $n$  vremenska ovisnost toplinskog efekta izmjenične komponente.

U slučaju nastanka većeg broja troleznih kratkih spojeva ( $i = 1, 2, \dots, r$ ) s malim vremenskim razdobljima između njih koriste se sljedeći izrazi:

$$\int i^2 dt = \sum_{i=1}^{i=r} I_{ki}''^2 (m_i + n_i) T_{ki} = I_{th}^2 T_k \quad (5.28)$$

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \int i^2 dt} \quad (5.29)$$

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=r} T_{ki} \quad (5.30)$$

gdje je:

- $T_{ki}$  vrijeme trajanja struje kratkog spoja za pojedini kratki spoj,
- $T_k$  suma vremena trajanja pojedine struje kratkog spoja.

Za kratke spojeve udaljene od generatora norma dopušta korištenje izraza  $n = 1$ , a ukoliko im je trajanje duže od 0,5 sekundi, vrijedi  $m + n = 1$ .

Kada je mreža zaštićena osiguračima ili prekidačima, njihov Jouleov integral može ograničiti vrijednost Jouleovog integrala izračunatog prema jednadžbama (5.26) i (5.28). Tada Jouleov integral određuju karakteristike rasklopnih elemenata.

## 5.7. Stacionarna struja kratkog spoja

Proračun struje kratkog spoja za stacionarni period manje je točan od proračuna početnog perioda kratkog spoja.

Za trofazne kratke spojeve u blizini generatora napajanih od strane jednog sinkronog generatora ili elektrane, stacionarna struja kratkog spoja  $I_k$  ovisi o sustavu uzbude, djelovanju regulatora napona i utjecaju zasićenja.

Sinkroni strojevi (generatori, motori i kompenzatori) doprinose struji  $I_k$  samo kada postoji impedancija između stezaljki stroja i mjesta kratkog spoja.

Maksimalna vrijednost stacionarne struje kratkog spoja  $I_k$  javlja se kada je uzbuda sinkronog generatora najveća:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{nG} \quad (5.31)$$

gdje je:

$I_{nG}$  nazivna struja generatora,

$\lambda_{max}$  faktor za proračun maksimalne vrijednosti stacionarne struje kratkog spoja.

Minimalna vrijednost stacionarne struje kratkog spoja napajanog od jednog izvora uz konstantnu uzbudu sinkronog stroja jednaka je:

$$I_{kmin} = \lambda_{min} I_{nG} \quad (5.32)$$

gdje je:

$I_{nG}$  nazivna struja generatora,

$\lambda_{min}$  faktor za proračun minimalne vrijednosti stacionarne struje kratkog spoja.

Proračun minimalne stacionarne struje u slučaju kratkog spoja u blizini generatora izvodi se prema izrazu:

$$I_{kmin} = \frac{c_{min} U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (5.33)$$

Faktor predopterećenja  $c_{min}$  uvodi se prema tablici (3.1.).

Nadalje, uvodi se efektivna reaktancija generatora:

$$X_{dP} = \frac{U_{nG}}{\sqrt{3} I_{kP}} \quad (5.34)$$

$I_{kP}$  označava stacionarnu struju trolnog kratkog spoja na stezaljkama generatora. Njezinu vrijednost moguće je dobiti od proizvođača.

Za slučaj trolnog kratkog spoja u mrežama ne-petljaste strukture stacionarna struja na mjestu nastanka kratkog spoja jednaka je zbroju individualnih struja kratkog spoja u stacionarnom periodu:

$$I_k = \sum_i I_{ki} \quad (5.35)$$

U mrežama petljaste strukture s više izvora, stacionarna struja približno je jednaka struji trolnog kratkog spoja u početnom periodu:

$$I_{kmax} = I''_{kmax} \quad (5.36)$$

$$I_{kmin} = I''_{kmin} \quad (5.37)$$

Struje  $I''_{kmax}$  i  $I''_{kmin}$  računaju se prema izrazima za maksimalnu, odnosno minimalnu struju kratkog spoja prikazanim u trećem poglavlju.

Za ostale vrste kratkih spojeva, stacionarna struja biti će jednaka početnoj struji kratkog spoja.

## 6. ZAKLJUČAK

Ovim radom pokazana je važnost proračuna struja kratkog spoja u dimenzioniranju opreme u skladu s mehaničkim i termičkim naprezanjima koje uzrokuje nastanak kratkog spoja. U skladu s međunarodnom normom IEC 60909 prikazan je kompletan proračun struja kratkog spoja koji struje opisuje kao funkcije vremena na mjestu nastanka kratkog spoja za cijelog njegovog trajanja.

Nadalje, metodom ekvivalentnog naponskog izvora na mjestu nastanka kratkog spoja i metodom simetričnih komponenti prikazano je znatno pojednostavljenje proračuna kratkog spoja. U prvom slučaju na mjestu nastanka kratkog spoja uvodi se naponski izvor koji omogućuje da se ostali izvori zamjene svojim impedancijama, dok u drugom slučaju nesimetriju koju u mrežu unosi kratki spoj zaobilazimo rastavljanjem sustava na tri simetrična trofazna sustava.

Kako bi korištenje prijašnjih metoda bilo uspješno potrebno je poznavanje impedancija elemenata elektroenergetskog sustava. Radom su prikazani izrazi za proračun impedancija svih važnijih elemenata sustava, kao što su transformatori, generatori, asinkroni motori, vodovi, prigušnice, itd. Isto tako prikazane su nadomjesne sheme prije navedenih elemenata kako bi se pojednostavio prikaz, a samim time i izračuni direktnog, inverznog i nultog simetričnog sustava.

Pomoću norme IEC 60909 prikazane su različite vrste struja koje se javljaju za vrijeme kratkog spoja. Za različite vrste kratkih spojeva potrebno je poznavati različite struje kratkog spoja kao što su udarna struja, rasklopna struja ili struja mjerodavna za ugrijavanje, kako bi izbor opreme u elektroenergetskom sustavu bio pravilan. Također pokazano je kako će se struje razlikovati za tri perioda kratkog spoja, a to su početni, prijelazni i stacionarni period kratkog spoja, što je uzrokovano promjenama u vrijednostima impedancija određenih elemenata sustava.

Zaključno, točan proračun struja kratkog spoja i pravilno modeliranje elemenata elektroenergetskog sustava od ključne su važnosti u ostvarivanju neprekidne opskrbe potrošača električnom energijom.

## 7. LITERATURA

[1] Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, Part 0, International standard IEC 60909, 2001.

[2] Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, Part 1, International standard IEC 60909, 2001.

[3] Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, Part 4, International standard IEC 60909, 2001.

[4] H. Požar: Visokonaponska rasklopna postrojenja, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.



## 8. SAŽETAK

Radom je prikazana važnost modeliranja elemenata elektroenergetskog sustava za proračuna kratkog spoja prema međunarodnoj normi IEC 60909. Kako bi se pojednostavio proračun struja kratkog spoja, koriste se metoda ekvivalentnog naponskog izvora i metoda simetričnih komponenti koje su ovim radom detaljno prikazane. Rad se osvrće i na izračun maksimalne i minimalne struje kratkog spoja, koje su bitne za dimenzioniranje električne opreme u slučaju maksimalne struje, odnosno odabir zaštitnih uređaja u slučaju minimalne struje kratkog spoja. Nadalje, prikazani su konačni izrazi za proračun impedancija elemenata sustava i njihove pripadne nadomjesne sheme, što omogućava pojednostavljenije proračuna struja kratkog spoja. Isto tako od interesa je poznavanje različitih vrsta struja kratkog spoja, kao što su udarna struja kratkog spoja, rasklopna struja kratkog spoja, početna struja kratkog spoja, itd., te su radom prikazani izrazi kojima dolazimo do njihovih vrijednosti za različite vrste kratkih spojeva.

**Ključne riječi:** proračun struja kratkog spoja, IEC 60909, impedancije elemenata elektroenergetskog sustava, početna struja kratkog spoja, udarna struja kratkog spoja.

### ABSTRACT

The paper shows the importance of modeling the elements of the power system for short-circuit calculation according to the international standard IEC 60909. In order to simplify the calculation of short-circuit currents, the method of equivalent voltage source at the short-circuit location and the method of symmetrical components are used, which are presented in detail in this paper. The paper also looks at the calculation of the maximum and minimum short-circuit current, which are essential for the sizing of electrical equipment in the case of maximum current and the selection of protective devices in the case of minimum short-circuit current. Furthermore, the final expressions for the calculation of the impedance of the system elements and their corresponding schemes are presented, which enables the simplification of the calculation of short-circuit currents. It is also of interest to know different types of short-circuit currents, such as peak short-circuit current, symmetrical breaking current, initial short-circuit current, etc., so the work presents the expressions which give their value for different types of short-circuits.

**Key words:** calculation of short-circuit currents, IEC 60909, impedances of power system elements, initial short-circuit current, peak short-circuit current.