# Proračun struja kratkog spoja računalnim programom EasyPower

**Lukač, Željko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:600514

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

**SVEUČILŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Stručni studij**

# PRORAČUN STRUJA KRATKOG SPOJA RAČUNALNIM PROGRAMOM EASY POWER

**Završni rad**

**Željko Lukač**

**Osijek, 2017.godina**

# SADRŽAJ

1. UVOD ..... 1
2. KRATKI SPOJ ..... 2
2.1. Metoda simetričnih komponenata ..... 2
2.2. Podjela kratkih spojeva ..... 4
2.2.1. Trofazni kratki spoj ..... 5
2.2.2. Dvofazni kratki spoj ..... 6
2.2.3. Jednofazni kratki spoj ..... 7
2.3. Struje kratkog spoja ..... 8
2.3.1. Subtranzijentna struja kratkog spoja ..... 8
2.3.2. Udarna struja ..... 9
2.3.3. Rasklopna struja kratkog spoja ..... 10
2.3.4. Termička i trajna struja kratkog spoja ..... 10
2.4. Uzroci kratkog spoja ..... 11
2.5. Posljedice kratkog spoja ..... 12
3. MJESTO NASTANKA KRATKOG SPOJA ..... 13
3.1. Kratki spoj daleko od generatora ..... 14
3.2. Kratki spoj blizu generatora ..... 16
4. PRORAČUN STRUJA KRATKOG SPOJA U EASY POWERU ..... 17
4.1. Scenarij 1 (kratki spoj na sabirnici 3) ..... 19
4.2. Scenarij 2 (kratki spoj na sabirnici 7) ..... 21
4.3. Scenarij 3 (kratki spoj na sabirnici 8) ..... 22
5. ZAKLJUČAK ..... 24
6. LITERATURA ..... 25
7. SAŽETAK ..... 26
8. SUMMARY ..... 26
9. ŽIVOTOPIS ..... 27
10. PRILOG ..... 28

# 1. UVOD

Kratki spoj je jedna od najnepoželjnijih pojava u postrojenjima. Nastaje kada električno naprezanje prijeđe električnu čvrstoću izolacije. Kratki spojevi u trofaznim mrežama mogu biti trofazni, dvofazni i jednofazni. Najčešći uzrok kratkog spoja je pojava prenapona. Prenaponi mogu biti atmosferski ili sklopni.

Kao posljedica kratkog spoja javljaju se velike struje (10 do 100 puta veće od pogonskih struja), termička i mehanička naprezanja.

Do termičkih naprezanja dolazi jer se vodiči zagrijavaju zbog Jouleovih gubitaka koji se javljaju zbog protjecanja struje i ovise o kvadratu struje i trajanju kratkog spoja.

Mehanička naprezanja uzrokuju lomove dijelova postrojenja prilikom čega mogu dovesti do novih kvarova u postrojenju. Mehanička naprezanja su uzrokovana elektromagnetskom silom koja ovisi o iznosu struja koje se javljaju kod kratkih spojeva. Najviše su ugrožene sabirnice koje se mogu saviti i potporni izolatori koji mogu puknuti.

Glavna značajka kratkog spoja je vrijeme trajanja. Struje kratkog spoja ovise o elektromotornoj sili izvora i o impedanciji strujnog kruga. Što je impedancija veća, to je manja vrijednost struje kratkog spoja. Kratki spoj ovisi i o mjestu nastanka, pa će se u radu opisati kratki spoj daleko od generatora i kratki spoj blizu generatora. Ako je kratki spoj blizu generatora, to znači da je smješten na sabirnicu ili blizu sabirnice i impedancija je manja. Ako je kratki spoj daleko od generatora, to znači da je električki daleko, odnosno da je velika impedancija.

Struje kratkih spojeva se računaju na svim naponskim razinama. Za proračun je potrebno znati podatke svih elemenata koji su u postrojenju. Tu spadaju impedancije, nazivni naponi, naponi kratkog spoja, grupa spoja, nazivne snage, duljina voda, jedinična reaktancija, jedinični otpor itd. Proračun se može izvršiti analitički i računalnim programima. Prednost računalnog programa je brzina i veličina, odnosno opseg računanja. Za klasični matematički proračun je potrebno izdvojiti više vremena nego za proračun pomoću računala. Neovisno o veličini mreže, računalni program izvrši proračun za vrlo kratko vrijeme (manje od sekunde).

U 4. poglavlju za proračun će se koristiti računalni program Easy Power.

# 2. KRATKI SPOJ

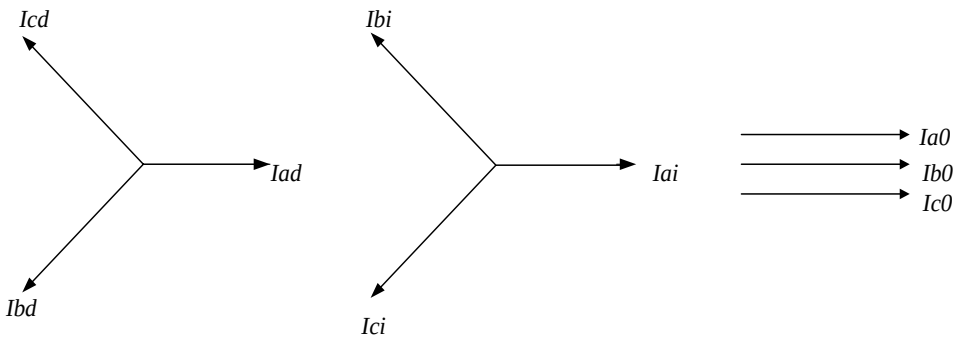
Kratki spoj nastaje dodirom faznih vodiča međusobno ili sa zemljom.

## 2.1. Metoda simetričnih komponenata

Radi jednostavnijeg proračuna prilika u mreži koristi se metoda simetričnih komponenata. Pretpostavka je da su sve tri faze simetrične. Ako su opterećenja simetrična (trofazni kratki spoj) može se koristiti ova metoda koja ima visok postotak točnosti. Sve ostale vrste kratkih spojeva su nesimetrične što otežava proračun. Međutim, ovaj problem se riješi tako što se nesimetrični sustav zamijeni sa simetričnim. Prilikom proračuna koristi se operator "a' koji zakreće veličinu za 120°. [3]

Postoje 3 simetrična sustava:

1) direktni sustav (oznaka d)
2) inverzni sustav (oznaka i)
3) nulti sustav (oznaka o)




**Sl.2.1.** *Simetrične komponente*

Kod ove metode struje po fazama se računaju kao zbroj direktne, inverzne i nulte komponente. Prema tome vrijede sljedeći izrazi:

$$\bar{I}_{\mathrm{a}} = \bar{\bar{I}}_{\mathrm{ad}} + \bar{\bar{I}}_{\mathrm{ai}} + \bar{\bar{I}}_{\mathrm{a0}} \quad (2\text{-}1)$$

$$\bar{\bar{I}}_{\mathrm{b}} = \bar{\bar{I}}_{\mathrm{bd}} + \bar{\bar{I}}_{\mathrm{bi}} + \bar{\bar{I}}_{\mathrm{b0}} \quad (2\text{-}2)$$

$$\bar{I}_{\mathrm{c}} = \bar{\bar{I}}_{\mathrm{cd}} + \bar{\bar{I}}_{\mathrm{ci}} + \bar{\bar{I}}_{\mathrm{c0}} \quad (2\text{-}3)$$

gdje su:

$\bar{\bar{I}}_{\mathrm{a}}$, $\bar{\bar{I}}_{\mathrm{b}}$, $\bar{I}_{\mathrm{c}}$ struje po fazama a, b, c, dok indeksi d, i , o označavaju direktni, inverzni i nulti sustav.

Struja po fazama a (L1), b (L2), c (L3) direktnog i inverznog i nultog sustava se računaju preko sljedećih formula:

$$\bar{I}_{\mathrm{ad}} = \bar{I}_{\mathrm{d}} \quad (2\text{-}4)$$

$$\bar{I}_{\mathrm{bd}} = a^2 \cdot \bar{\bar{I}}_{\mathrm{d}} \quad (2\text{-}5)$$

$$\bar{I}_{\mathrm{cd}} = a \cdot \bar{\bar{I}}_{\mathrm{d}} \quad (2\text{-}6)$$

$$\bar{\bar{I}}_{\mathrm{ai}} = \bar{\bar{I}}_{\mathrm{i}} \quad (2\text{-}7)$$

$$\bar{\bar{I}}_{\mathrm{bi}} = a \cdot \bar{\bar{I}}_{\mathrm{i}} \quad (2\text{-}8)$$

$$\bar{\bar{I}}_{\mathrm{ci}} = a^2 \cdot \bar{\bar{I}}_{\mathrm{i}} \quad (2\text{-}9)$$

$$\bar{\bar{I}}_{\mathrm{a0}} = \bar{\bar{I}}_{\mathrm{b0}} = \bar{\bar{I}}_{\mathrm{c0}} \quad (2\text{-}10)$$

Ako su poznate struje direktnog, nultog i inverznog sustava mogu se izračunati struje po fazama preko jednadžbe (2-11).

$$\begin{bmatrix} \bar{\bar{I}}_{\mathrm{a}} \\ \bar{\bar{I}}_{\mathrm{b}} \\ \bar{\bar{I}}_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\bar{I}}_{0} \\ \bar{I}_{\mathrm{d}} \\ \bar{\bar{I}}_{\mathrm{i}} \end{bmatrix} \quad (2\text{-}11)$$

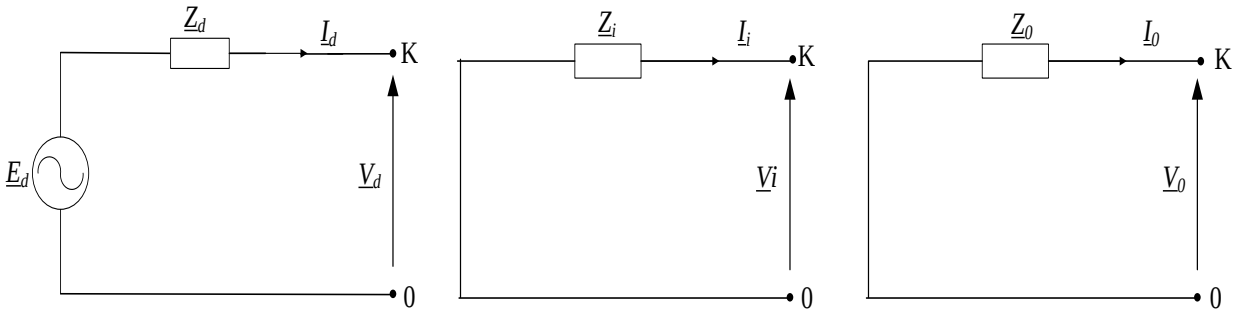
Struje direktnog, inverznog i nultog sustava se mogu računati preko jednadžbe (2-12).

$$\begin{bmatrix} \bar{\bar{I}}_{0} \\ \bar{\bar{I}}_{\mathrm{d}} \\ \bar{\bar{I}}_{\mathrm{i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\bar{I}}_{\mathrm{a}} \\ \bar{I}_{\mathrm{b}} \\ \bar{I}_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} \quad (2\text{-}12)$$

Gore navedene jednadžbe vrijede i za proračun napona.

Prilikom proračuna struja kratkog spoja potrebno je poznavati Theveninov teorem. Preko Theveninovog teorema je moguće reducirati mrežu. Reduciranje se provodi za sva 3 simetrična sustava. Prema slici 2.2. može se vidjeti da izvor postoji samo za direktni sustav. Nulta

impedancija se koristi samo kada nulta komponenta struje može teći (npr. preko uzemljenog zvjezdišta transformatora). [3]




**Sl.2.2.** *Nadomjesne sheme direktnog, inverznog i nultog sustava*

Na slici 2.2. su prikazane nadomjesne sheme za direktni, inverzni i nulti sustav. Iz slike se preko Kirchoffovog zakona za napone mogu izračunati naponi i struje direktne, inverzne i nulte komponente, pa vrijedi:

$$\bar{V}_{\mathrm{d}} = \bar{E}_{\mathrm{d}} - \bar{I}_{\mathrm{d}} \cdot \bar{Z}_{\mathrm{d}} \quad (2\text{-}13)$$

$$\bar{V}_{\mathrm{i}} = -\bar{I}_{\mathrm{i}} \cdot \bar{Z}_{\mathrm{i}} \quad (2\text{-}14)$$

$$\bar{V}_{0} = -\bar{I}_{0} \cdot \bar{Z}_{0} \quad (2\text{-}15)$$

## 2.2. Podjela kratkih spojeva

Kratki spoj može biti unutar električnog uređaja ili u mreži.

S obzirom na vrijeme trajanja može biti prolazni i trajni kratki spoj [6]. U transformatorskim stanicama se koriste releji zaštite sa funkcijom APU (automatski ponovni uklop). Ako je kratki spoj prolaznog karaktera relej će ponovno uključiti prekidač i tako se kvar otklonio. Kada je riječ o trajnom kratkom spoju, APU neće moći otkloniti kvar pa je potrebna intervencija od strane stručnog osoblja.

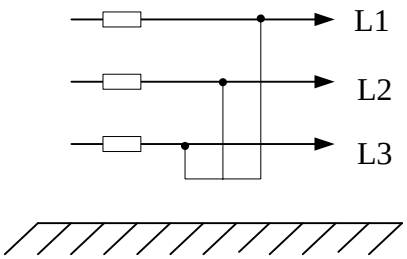
Glavna podjela kratkog spoja u trofaznim mrežama je sljedeća:

- Trofazni kratki spoj
- Dvofazni kratki spoj
- Dvofazni kratki spoj sa zemljom

- Jednofazni kratki spoj-u uzemljenim i neuzemljenim mrežama

Svaka od gore navedenih vrsta kratkog spoja se promatra zasebno za sebe jer upravo o vrsti kratkog spoja ovise i prilike u mreži. [1]

### 2.2.1. Trofazni kratki spoj




**Sl.2.3.** *Trofazni kratki spoj*

Ova vrsta kratkog spoja je najrjeđa. Javlja se u samo 5% slučajeva. Do trofaznog kratkog spoja dolazi spajanjem sve tri faze međusobno ili sa zemljom. Trofazni kratki spoj je jedina simetrična vrsta kratkog spoja. [1]

Iako se javlja u samo 5 % slučajeva, struja trofaznog kratkog spoja je najveća i koristi se pri dimenzioniranju opreme u postrojenju.

Odgovarajuće relacije za trofazni kratki spoj su:

$$\bar{V}_\mathrm{a} = \bar{V}_\mathrm{b} = \bar{V}_\mathrm{c} \tag{2-16}$$

$$\bar{I}_\mathrm{a} + \bar{I}_\mathrm{b} + \bar{I}_\mathrm{c} = 0 \tag{2-17}$$

Simetrične komponente napona direktnog, inverznog i nultog sustava iznose nula. Kako je trofazni kratki spoj simetričan, struja teče samo kroz direktnu impedanciju koja se računa preko formule (2-18), a struje inverznog i nultog sustava su jednake nuli.

$$\bar{I}_\mathrm{d} = \frac{\bar{E}_\mathrm{d}}{\bar{Z}_\mathrm{d}} \tag{2-18}$$

Struje po fazama se računaju preko sljedećih jednadžbi.

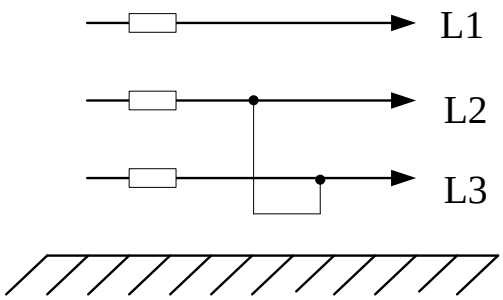
$$\bar{I}_\mathrm{a} = \bar{I}_\mathrm{d} + \bar{I}_\mathrm{i} + \bar{I}_0 = \bar{I}_\mathrm{d} \tag{2-19}$$

$$\bar{I}_\mathrm{b} = a^2 \cdot \bar{I}_\mathrm{d} \tag{2-20}$$

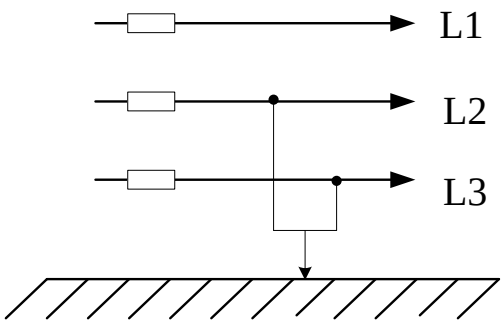
$$\bar{I}_\mathrm{c} = a \cdot \bar{I}_\mathrm{d} \tag{2-21}$$

### 2.2.2. Dvofazni kratki spoj

Javlja se u 15 % slučajeva. Dvofazni kratki spoj može biti spoj dvije faze međusobno (slika 2.4.) ili spoj dvije faze sa zemljom (slika 2.5.). Ova vrsta kratkog spoja je nesimetrična.




**Sl.2.4.** *Dvofazni kratki spoj*




**Sl.2.5.** *Dvofazni kratki spoj sa zemljom*

Za dvofazni kratki spoj vrijede sljedeće relacije:

$$\bar{I}_b = \bar{I}_c \quad (2\text{-}2)$$

$$\bar{I}_a = \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0 \quad (2\text{-}23)$$

$$\bar{I}_d = \bar{I}_i = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_b \cdot (a - a^2) \quad (2\text{-}24)$$

$$\bar{I}_0 = 0 \quad (2\text{-}25)$$

$$\bar{V}_d = \bar{V}_i = \frac{1}{3} \cdot [\bar{V}_a + \bar{V}_b \cdot (a + a^2)] \quad (2\text{-}26)$$

$$\bar{V}_0 = 0 \quad (2\text{-}27)$$

$$\bar{I}d = -\bar{I}i = \frac{\bar{E}d}{\bar{Z}d+\bar{Z}i} \quad (2\text{-}28)$$

Fazne struje su:

$$\bar{I}_{\mathrm{a}} = 0 \tag{2-29}$$

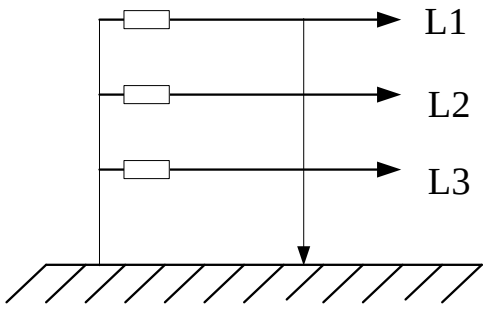
$$\bar{I}_{\mathrm{b}} = a^2 \cdot \bar{I}_{\mathrm{d}} + a \cdot \bar{I}_{\mathrm{i}} + \bar{I}_0 = \frac{\bar{E}d \cdot (a^2 - a)}{\bar{Z}d + \bar{Z}i} \tag{2-30}$$

$$\bar{I}_{\mathrm{c}} = a \cdot \bar{I}_{\mathrm{d}} + a^2 \cdot \bar{I}_{\mathrm{i}} + \bar{I}_0 = \frac{\bar{E}d \cdot (a - a^2)}{\bar{Z}d + \bar{Z}i} \tag{2-31}$$

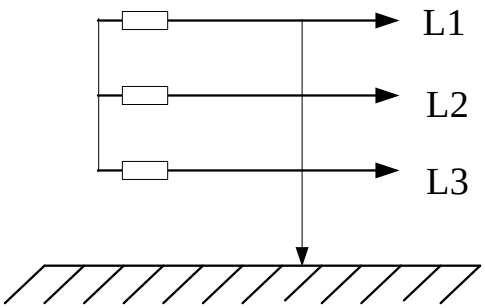
### 2.2.3. Jednofazni kratki spoj

Jednofazni kratki spoj je spoj jedne faze sa zemljom. Ova vrsta kratkog spoja je nesimetričnog karatkera i najčešće se događa (80 % slučajeva). Može biti u uzemljenim i u neuzemljenim mrežama. Kratki spoj u neuzemljenim mrežama se naziva zemljospoj.

Na slici 2.6. je prikazan jednofazni kratki spoj u mreži sa uzemljenim zvjezdištem, a na slici 2.7. je prikazan jednofazni kratki spoj u mreži sa neuzemljenim zvjezdištem.




**Sl.2.6.** *Jednofazni kratki spoj u mreži sa uzemljenim zvjezdištem*




**Sl.2.7.** *Jednofazni kratki spoj u neuzemljenoj mreži*

Za jednofazni kratki spoj vrijede sljedeće relacije:

$$\bar{V}_{\mathrm{a}} = 0 \tag{2-32}$$

$$\bar{I}_{\mathrm{b}} = \bar{I}_{\mathrm{c}} \tag{2-33}$$

$$\bar{I}_{\mathrm{d}} = \bar{I}_{\mathrm{d}} = \bar{I}_{0} = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_{\mathrm{a}} \tag{2-34}$$

$$\bar{V}_{\mathrm{d}} = -\bar{V}_{\mathrm{i}} - \bar{V}_{0} \tag{2-35}$$

$$\bar{I}_{\mathrm{d}} = \bar{I}_{\mathrm{i}} = \bar{I}_{0} = \frac{\bar{E}d}{\bar{Z}d+\bar{Z}i+\bar{Z}0} \tag{2-36}$$

## 2.3. Struje kratkog spoja

Struje koje se određuju prilikom proračuna kratkog spoja su:

- Subtranzijentna struja
- Udarna struja
- Rasklopna struja
- Termička struja
- Trajna struja

### 2.3.1. Subtranzijentna struja kratkog spoja

Oznaka subtranzijentne struje kratkog spoja je $I_k$". To je efektivna vrijednost početne struje kratkog spoja. Ona nam je potrebna za proračun svih ostalih struja. Ova struja se računa tako što se u proračunu napon poveća za 10 % jer je to napon koji djeluje za vrijeme kratkog spoja. Dakle, u proračunu se koristi faktor "c" koji iznosi 1,1 za mreže srednjeg i visokog napona, a za mreže niskog napona (do 1000 V) iznosi 1, odnosno napon se ne mijenja.

Subtranzijentna struja trofaznog kratkog spoja se računa preko jednadžbe (2-37).

$$I''_{\mathrm{k3}} = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z''_{\mathrm{k,d}}} \tag{2-37}$$

gdje je:

-*U*- napon mreže [V]

-$Z''_{\mathrm{k,d}}$- subtranzijentna impedancija direktnog sustava [Ω]

Subtranzijentna struja jednofaznog kratkog spoja se računa preko jednadžbe (2-38).

$$I_{k1}'' = \frac{c \cdot U \cdot \sqrt{3}}{|\bar{Z}''_{k,d} + \bar{Z}''_{k,i} + \bar{Z}''_{k,0}|} \qquad (2\text{-}38)$$

gdje je:

-$Z''_{k,d}$- impedancija direktnog sustava [Ω]

-$Z''_{k,i}$- impedancija inverznog sustava [Ω]

-$Z''_{k,0}$- impedancija nultog sustava [Ω]

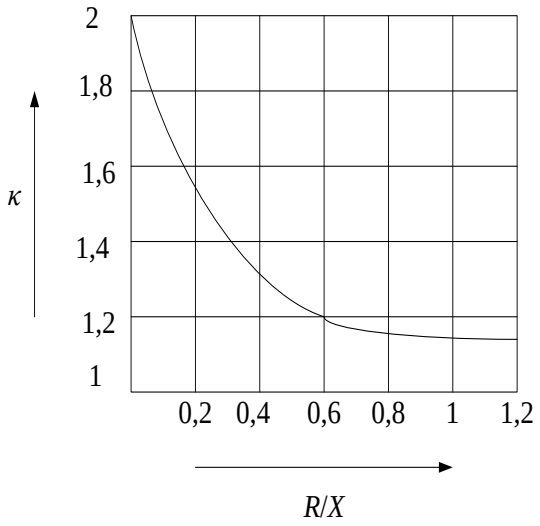
### 2.3.2. Udarna struja

Ovo je najveća struja koja se može pojaviti u slučaju kratkog spoja. Računa se da bi se odredila najveća mehanička naprezanja opreme u postrojenju. Kada se znaju najveća naprezanja može se izabrati oprema koja može izdržati ta naprezanja. [1]

Kod udarne struje se ne zanemaruje djelatni otpor, nego baš naprotiv, udarna struja ovisi o otporu.

$$Iu = \sqrt{2} \cdot Ik'' \cdot \kappa \qquad (2\text{-}39)$$

gdje je κ udarni koeficijent koji ovisi o omjeru R/X i očitava se iz slike 2.8.




**Sl.2.8.** *Udarni koeficijent*

### 2.3.3. Rasklopna struja kratkog spoja

Rasklopna struja je efektivna vrijednost udarne struje koje teče kroz prekidač kada dođe do razdvajanja kontakata na prekidaču.

Ovisi o koeficijentu μ. Taj koeficijent ovisi o vremenu koje je proteklo od nastanka kratkog spoja do onog trenutka kada su se razdvojili kontakti na prekidaču i ovisi o omjeru početne i nazivne struje kratkog spoja. [1]

Prema nazivu "rasklopna struja" može se zaključiti da je ona potrebna za dimenzioniranje rasklopne opreme srednjenaponskog ili visokonaponskog postrojenja.

$$I_{\mathrm{r}} = I_{\mathrm{k}}'' \cdot \mu \qquad (2\text{-}40)$$

### 2.3.4. Termička i trajna struja kratkog spoja

Poznato je da su struje koje se javljaju kod kratkih spojeva velike jakosti. Rezultat toga je zagrijavanje dijelova postrojenja. Struja koja je mjerodavna za zagrijavanje se zove termička struja kratkog spoja.

Definicija termičke struje kaže da je to efektivna vrijednost srednje struje kratkog spoja koja za vrijeme trajanja kratkog spoja proizvede jednaku količinu topline kao i "prava" vrijednost struje kratkog spoja. [3]

Termička struja ovisi o istosmjernoj i izmjeničnoj komponenti.

$$I_{\mathrm{kt}=}\sqrt{n+m} \cdot I_{\mathrm{k}}'' \qquad (2\text{-}41)$$

gdje je :

-n- član određen izmjeničnom komponentom udarne struje i ovisi o trajanju kratkog spoja i omjeru početne i trajne struje.

-m- član određen istosmjernom komponentom koji ovisi o udarnom koeficijentu i o vremenu trajanja kratkog spoja.

Trajna struja kratkog spoja se pojavljuje u ustaljenom stanju, odnosno to je struja nakon prijelazne pojave. Ovisi o koeficijentu λ, a taj koeficijent ovisi o omjeru početne i nazivne struje.

Jednadžba (2-42) vrijedi za struju jednofaznog kratkog spoja, a jednadžba (2-43) vrijedi za struju trofaznog kratkog spoja.

$$I_{k1=}3 \cdot \lambda \cdot I_n \quad (2\text{-}42)$$

$$I_{k3} = \lambda \cdot I_n \quad (2\text{-}43)$$

## 2.4. Uzroci kratkog spoja

Postoji više uzroka kratkog spoja. S obzirom na vrijeme trajanja kratkog spoja, uzročnici mogu biti trajni i prolazni. Prolazni uzroci su pojava prenapona, pad grane na vod ili životinja. Prolazni uzročnik stvara luk koji nestaje nakon isključenja i vod se može ponovno uključiti. Pod trajne uzročnike se ubrajaju neočišćeni i slomljeni izolatori (proboj izolacije) te pad vodiča ili stupa. [5]

Prenaponi se najčešće javljaju kao posljedica atmosferskog pražnjenja. Osim udara groma, uzrok prenapona mogu biti sklopne radnje (uklapanje/isklapanje prekidača ili rastavljača). Prenaponi se mogu podijeliti na unutrašnje i vanjske.

Unutrašnji prenaponi se javljaju pri isključenju/uključenju voda i pri promjeni opterećenja. Tada dolazi do napona koji mogu biti 2 puta veći od nazivnih napona. [5]

Pod vanjskim prenaponom se podrazumijeva udar groma u vod. Ova vrsta prenapona je najopasnija jer ne ovisi o naponu mreže nego o jakosti udara groma. Vanjski prenaponi mogu biti inducirani i prenaponi direktnog udara groma. Razlika je u tome što inducirani nastaju prilikom udara groma blizu postrojenja, a prenaponi direktnog udara groma nastaju udarom groma u bilo koji dio postrojenja. Struje koje se javljaju kod direktnog udara groma su iznimno velike. [5]

Pri udaru groma u vod, struja groma dijeli se na lijevu i desnu stranu od mjesta udara i tako stvara putne valove koji se s vremenom mijenjaju. Takav putni val nailazi na omski otpor, kapacitivni otpor, otpor voda i induktivni otpor. Međutim, u proračunima se smatra da je vod idealan, pa se u obzir uzimaju samo induktivni i kapacitivni otpor što se može vidjeti iz relacije (2-44).

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2\text{-}44)$$

gdje je:

-*Z*- impedancija voda [Ω]

-*L*- induktivni otpor [H]

-*C*- kapacitivni otpor [F]

Za zaštitu od prenapona koriste se odvodnici prenapona. Svrha odvodnika prenapona je smanjenje napona na veličinu koja nije opasna za izolaciju. Postavljaju se na strateška mjesta, odnosno na ulazu u transformatorsku stanicu ili na sabirnice. [7]

## 2.5. Posljedice kratkog spoja

Posljedice kratkog spoja su:

1) Oštećenje opreme
2) Prestanak sinkronizma
3) Pojava struja velikih jakosti (10-100 p.u.)
4) Požar
5) Ekonomske posljedice
6) Termička naprezanja
7) Mehanička naprezanja
8) Padovi napona

Struje kratkog spoja predstavljaju veliku opasnost za osoblje u postrojenju i opremu. Da bi se izbjegle neželjene posljedice potrebno je koristiti zaštitnu opremu (osigurači, prekidači). Posljedice su veće ako kratki spoj traje duže. Zbog toga je potrebno izabrati opremu koja može isključiti kratki spoj u što kraćem vremenskom roku kako bi se posljedice svele na minimum.

Struje koje su nekoliko puta veće od pogonskih struja uzrokuju termička naprezanja i tako nastaju visoke temperature koje zagrijavaju dijelove postrojenja. Najviše su ugroženi kabeli i transformatori. Zagrijavanjem može doći do požara koji uzrokuje financijske štete. [2]

Mehanička naprezanja se pojavljuju zbog djelovanja elektromagnetske sile koja je posljedica djelovanja struja velike jakosti. Najviše su ugroženi izolatori i sabirnice koje se dimenzioniraju tako da izdrže električna i mehanička naprezanja. [1]

Također dolazi do pada napona pa dolazi do poremećaja u radu trošila (npr. motori priključeni na mrežu).

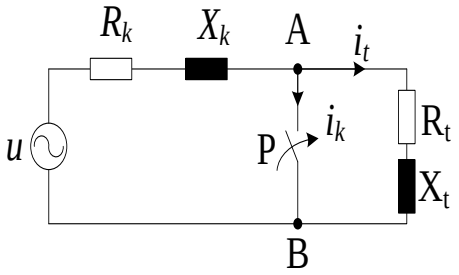
Prestanak sinkronizma je najčešće povezan sa transformatorima i generatorima. Ako dođe do prestanka sinkronizma, transformatori koji su u paralelnom radu neće moći raditi.

# 3. MJESTO NASTANKA KRATKOG SPOJA

Kratki spoj može nastati daleko od generatora i blizu generatora. To nije fizička udaljenost, nego se u obzir uzimaju vrijednosti impedancija, odnosno reaktancija između generatora i mjesta gdje je nastao kratki spoj.

Struja kratkog spoja ovisi o tome da li je kratki spoj daleko ili blizu (u obzir se uzimaju impedancije) generatora. Struja je veća što je kratki spoj bliže generatoru, odnosno što je manja impedancija između generatora i mjesta kvara.

Kada dođe do kratkog spoja, ta pojava prolazi kroz više prijelaznih procesa. Za analizu procesa se koristi shema koja je prikazana na slici 3.1.




**Sl.3.1.** *Pojednostavljena shema strujnog kruga*

Ovaj strujni krug sadrži idealni izmjenični izvor, prekidač, impedanciju ispred prekidača i impedanciju potrošača odnosno tereta. Kada dođe do kratkog spoja, struja kratkog spoja je ograničena samo impedancijom. [4]

Struja kratkog spoja ovisi o realnoj i imaginarnoj komponenti impedancije. Realni dio se odnosi na otpor, a imaginarni na reaktanciju. Imaginarni dio je inače veći od realnog dijela impedancije. Impedancija kratkog spoja i kut se računaju preko sljedeće dvije formule.

$$\bar{Z}_{\mathrm{k}} = R_{\mathrm{k}} + {}_{\mathrm{j}}X_{\mathrm{k}} = \sqrt{R_{\mathrm{k}}{}^2 + X_{\mathrm{k}}{}^2} \quad (3\text{-}1)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\frac{Xk}{Rk} \quad (3\text{-}2)$$

Napon se računa preko formule (3-3).

$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot sin\omega t \quad (3\text{-}3)$$

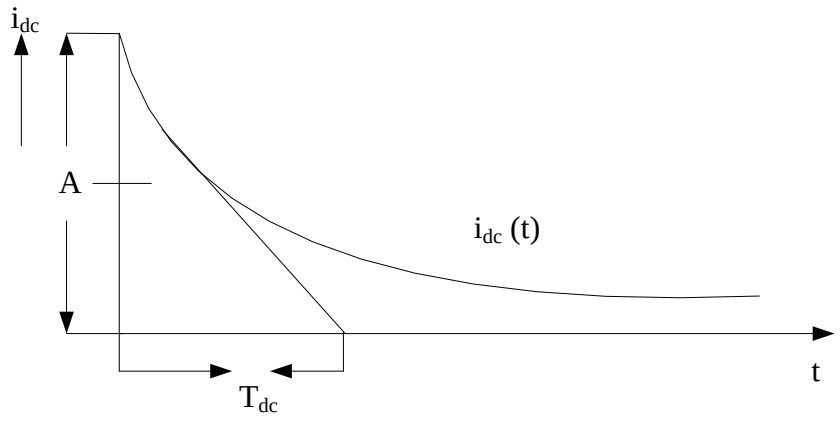
## 3.1. Kratki spoj daleko od generatora

Kada kratki spoj nastupi daleko od generatora, reaktancija generatora je veća, odnosno razlika između početne i trajne struje je manja u odnosu kada do kratkog spoja dođe blizu generatora. Ovakav slučaj je najčešći.

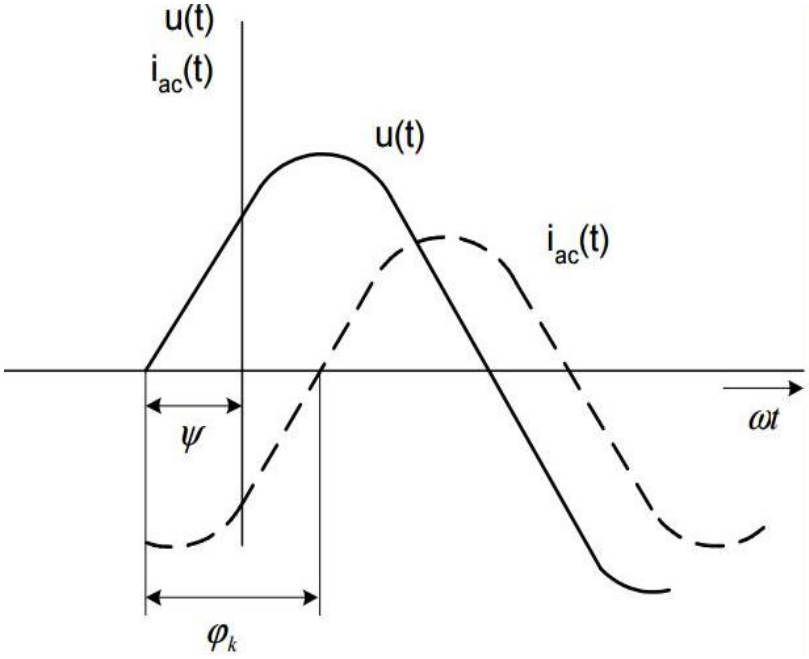
Struje kratkog spoja se mogu podijeliti na dvije komponente:

- istosmjerna komponenta struje kratkog spoja
- izmjenična komponenta struje kratkog spoja

Na slici 3.2. i 3.3. su prikazane istosmjerna i izmjenična komponenta, a na slici 3.4. je prikazana ukupna struja kratkog spoja.




**Sl.3.2.** *Istosmjerna komponenta struje kratkog spoja*




**Sl.3.3.** *Izmjenična komponenta struje kratkog spoja* [4]

Kao što se može vidjeti na slici, izmjenična komponenta je sinusnog oblika. Izmjenična komponenta se računa preko formule (3-4).

$$i_{ac}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{ac} \cdot \sin(\omega t + \Psi_k - \varphi k) \qquad (3\text{-}4)$$

gdje je:

$\Psi$k – kut sklapanja napona [°]

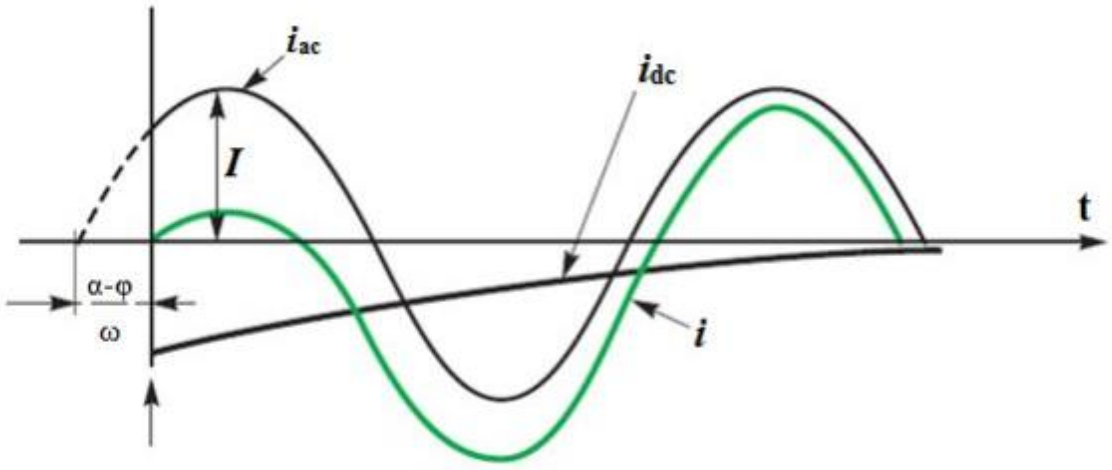
$\varphi$k - kut impedancije kratkog spoja [°]

$\omega$ – kružna frekvencija [rad/s]

$I_{ac}$ se računa preko sljedeće formule:

$$I_{ac} = \frac{U}{Zk} \qquad (3\text{-}5)$$

Ukupna struja kratkog spoja kada je kratki spoj daleko od generatora prikazana je na slici 3.4. i označena je zelenom bojom. Jednaka je zbroju istosmjerne i izmjenične komponente ($i=i_{dc}+i_{ac}$). Kada dođe do kratkog spoja (u trenutku t=0 s) ta struja je jednaka nuli.




**Sl.3.4.** *Ukupna struja kratkog spoja* [8]

## 3.2. Kratki spoj blizu generatora

Tada je najveća razlika između subtranzijentne i trajne struje kratkog spoja, tj. trajna struje je puno manja od početne. [4]

Poznato je da se impedancija sastoji od realnog i imaginarnog dijela (otpor i reaktancija), ali se u proračunu koristi samo reaktancija jer je djelatni otpor zanemariv pa je $Z=X$. Reaktancija se mijenja u vremenu i prolazi kroz 3 stanja koji su opisani u primjeru 1. U ustaljenom stanju je najveća reaktancija i ona najviše smanji struju kratkog spoja.

Primjer 1: Kratki spoj traje 0,5 sekundi.

a) t=0 s - subtranzijentno stanje (najmanja reaktancija, a najveća struja)

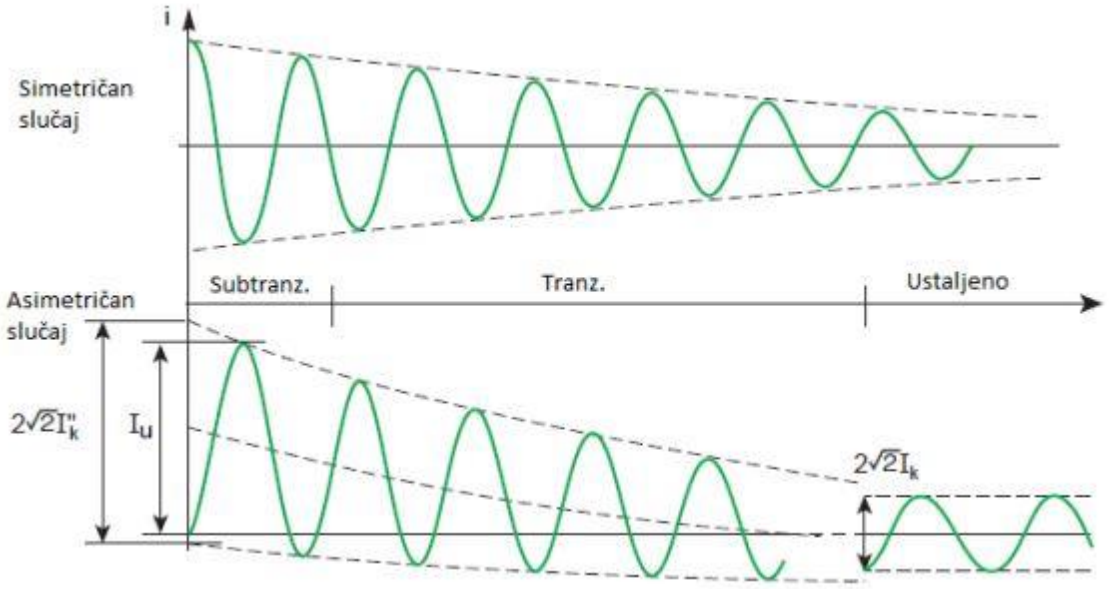
Tada se javlja subtranzijentna struja $I_k''$.

b) t=0,2 s – prijelazno stanje (tada je ta reaktancija veća od početne)

Tranzijentna struja $I_k'$ je manja od početne.

c) t=0,5 s – ustaljeno stanje (tada je reaktancija najveća)

Kada dođe do ustaljenog stanja, struja kratkog spoja $I_k$ je najmanja. [1]




**Sl.3.5.** *Kratki spoj blizu generatora za simetričan i asimetričan slučaj* [8]

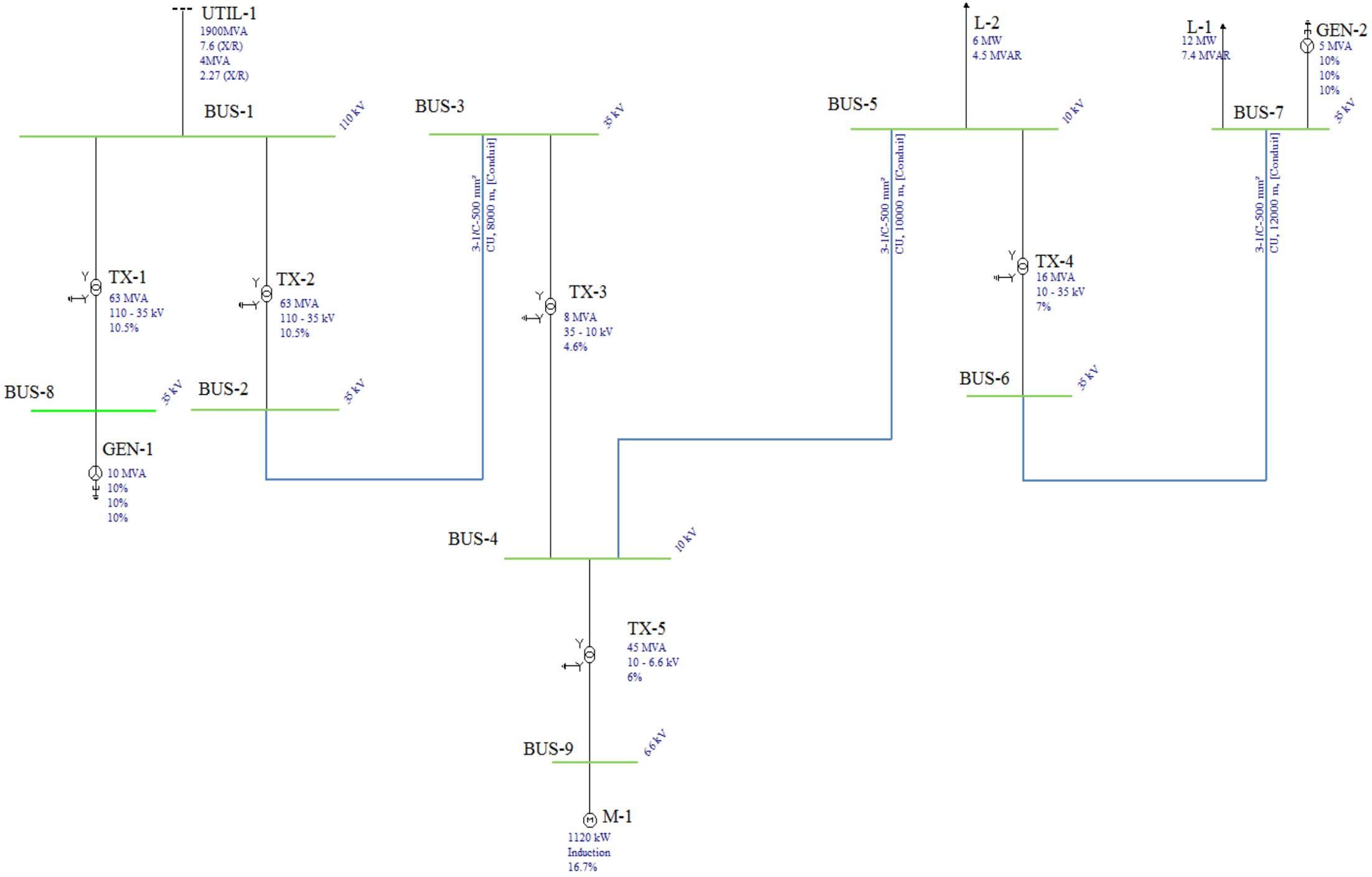
# 4. PRORAČUN STRUJA KRATKOG SPOJA U EASY POWERU

Danas, u moderno doba, sve se više koriste računala. Kako bi se olakšala problematika analize i simulacije rada elektroenergetskog sustava inženjeri diljem svijeta su razvili različite programe koji omogućuju proračun putem računala.

Za proračun struja trofaznog kratkog spoja u ovom radu koristi se računalni program Easy Power. Osim proračuna kratkih spojeva, može se koristiti za harmonijske analize, za provjeru rasklopne opreme kao i za proračun tokova snaga. [8]

Proračun se može izvršiti tek kada se napravi shema i kada se parametriraju svi elementi.

Na slici 4.1. je prikazana shema mreže koja se koristila za analizu.




**Sl.4.1.** *Radijalna mreža sa jednim izvorom napajanja*

Parametri elemenata i rezultati simulacije su zadani u prilogu.

Nakon parametriranja elemenata, moguće je izvršiti željeni proračun. U ovom proračunu postoje 3 scenarija, odnosno kratki spoj je simuliran na 3 sabirnice (35 kV). Za svaki scenarij postoji 8 slučajeva. Ovaj proračun se radio tako što su se generatori i motor uključivali i isključlivali i na taj način su dobiveni različiti rezultati simulacije za svaki scenarij.

Veliki utjecaj na struju kratkog spoja imaju impedancije elemenata. Ako je kratki spoj električki dalje od izvora, izvor ima manji utjecaj i struja je manja. Ovakav slijed događaja se podrazumijeva jer se u proračunu uzimaju impedancije svih elemenata (vodovi, transformatori, motori, generatori).

Ako je kratki spoj električki blizu, onda izvor ima velik utjecaj jer je ukupna impedancija svih elemenata manja, pa je doprinos mrežnog izvora u ukupnoj struji kratkog spoja veći.

## 4.1. Scenarij 1 (kratki spoj na sabirnici 3)

Kada dođe do kratkog spoja, struja kratkog spoja je najveća na mjestu gdje je nastao (u ovom slučaju sabirnica 3).

Ova sabirnica je napajana vodom 1 iz smjera sabirnice 2 i sabirnice 4. Sabirnica 4 je na 10-kilovoltnom naponskom nivou pa je struju potrebno preračunavati na 35-kilovoltnu naponsku razinu. To se računa tako što se struja iz smjera sabirnice 4 pomnoži sa omjerom 10/35 jer se kratki spoj dogodio na sabirnici koja je na 35-kilovoltnoj razini. Veću struju "daje" sabirnica 2 od sabirnice 4 jer je sabirnica 2 na višem naponskom nivou (vidi sliku 4.1.)

Struja kratkog spoja najviše ovisi o izvoru. Kada su svi elementi uključeni, za čak 89 % struje kratkog spoja na sabirnici 3 je zaslužan izvor. Struja kratkog spoja tada iznosi 6,087 kA. Kod izvora je također potrebno preračunavati struju jer je izvor na 110 kV, pa se koristi omjer 110/35.

Najmanja struja kratkog spoja se javlja kada su svi dodatni izvori (generatori i motor) isključeni (osim mrežnog izvora). Iznosi 5,665 kA. Tada je sabirnica 3 napajana samo vodom 1 iz smjera sabirnice 2. Kako su dodatni izvori (generatori i motor) isključeni, struja ovisi samo o mrežnom izvoru (vidi tablicu 4.31).

U svim slučajevima (koji su prikazani u tablicama u prilogu) najveći utjecaj ima mrežni izvor.

Od elemenata sa rotirajućim dijelovima najveći utjecaj ima generator 2, a zatim slijede motor i generator 1. Kada se isključi generator 2 struja kratkog spoja je manja za 239 A (vidi tablicu 4.1.).

**Tab.4.1.** *Struja kratkog spoja sa uključenim i isključenim generatorom 2*

| Struja na sabirnici 3 sa svim uključenim elementima [kA] | Struja na sabirnici 3 sa isključenim generatorom 2 [kA] |
|---|---|
| 6,087 | 5,848 |

Kada se isključi samo motor, struja kratkog spoja je za 116 A manja nego kada su generatori i motor uključeni (vidi tablicu 4.2.). Kod motora je potrebno struju množiti sa omjerom 6,6/35 jer je motor smješten na sabirnici od 6,6 kV.

**Tab.4.2.** *Struja kratkog spoja sa uključenim i isključenim motorom*

| Struja na sabirnici 3 sa svim uključenim elementima [kA] | Struja na sabirnici 3 sa isključenim motorom [kA] |
|---|---|
| 6,087 | 5,971 |

Kada se isključi samo generator 1 struja je manja za samo 44 A (vidi tablicu 4.3.).

**Tab.4.3.** *Struja kratkog spoja sa uključenim i isključenim generatorom 1*

| Struja na sabirnici 3 sa svim uključenim elementima [kA] | Struja na sabirnici 3 sa isključenim generatorom 1 [kA] |
|---|---|
| 6,087 | 6,043 |

U ovom scenariju su se proučavali i padovi napona na sabirnicama koje napajaju sabirnicu na kojoj se dogodio kvar i padovi napona na sabirnicama na kojima se nalaze rotirajući elementi.

U svim slučajevima uključivanja/isključivanja elemenata najmanji pad napona je na sabirnici 8 jer je ta sabirnica blizu mrežnog izvora i generatora.

## 4.2. Scenarij 2 (kratki spoj na sabirnici 7)

U ovom scenariju je najmanja struja kratkog spoja ako se usporedi sa scenarijem 1 i 3. Sabirnica 7 je napajana vodom 3 iz smjera sabirnice 6. Ovdje nije potrebno preračunavati struju jer su obe sabirnice na istom naponskom nivou. Preračunavanje se vrši samo za izvor i motor.

Sa uključenim motorom i generatorima struja iznosi 1,188 kA, a sa isključenim motorom i generatorima iznosi 0,361 što je 3 puta manje.

U slučaju kada su uključeni motor i generatori, najveći doprinos struji kratkog spoja ima generator 2 jer se nalazi na sabirnici na kojoj se dogodio kvar. Generator 2 doprinosi struji kratkog spoja sa 69 %, a ostalih 31 % doprinose izvor, generator 1 i motor. U ovom slučaju generator 1 i motor zajedno doprinose samo 41 A (vidi tablicu 4.33.)

U tablici 4.4. je prikazan utjecaj generatora 2. Struja kratkog spoja sa isključenim generatorom 2 je skoro jednaka struji sa svim isključenim elementima. To pokazuje da generator 2 ima najveći utjecaj.

Najmanji utjecaj ima generator 1. To se podrazumijeva jer je električki daleko, odnosno impedancija je velika. U tablici 4.5. je prikazan utjecaj generatora 1. Iz tablice se može vidjeti da je struja ista u slučaju kada se upali i ugasi generator 1.

**Tab.4.4.** *Struja kratkog spoja sa uključenim i isključenim generatorom 2*

| Struja na sabirnici 7 sa svim uključenim elementima [kA] | Struja na sabirnici 7 sa isključenim generatorom 2 [kA] |
|---|---|
| 1,188 | 0,366 |

**Tab.4.5.** *Struja kratkog spoja sa uključenim i isključenim generatorom 1*

| Struja na sabirnici 7 sa svim uključenim elementima [kA] | Struja na sabirnici 7 sa isključenim generatorom 1 [kA] |
|---|---|
| 1,188 | 1,188 |

**Tab.4.6.** *Struja kratkog spoja sa uključenim i isključenim motorom*

| Struja na sabirnici 7 sa svim uključenim elementima [kA] | Struja na sabirnici 7 sa isključenim motorom [kA] |
|---|---|
| 1,188 | 1,183 |

Najveći pad napona je na susjednoj sabirnici 6.

## 4.3. Scenarij 3 (kratki spoj na sabirnici 8)

U ovom scenariju se javlja najveća struja kratkog spoja. Sa svim uključenim dodatnim izvorima ta struja iznosi 9,200 kA.

**Tab.4.7.** *Usporedba struja kratkog spoja za sva tri scenarija*

| Sabirnica | 3 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|
| Struja kratkog spoja | 6,087 | 1,188 | 9,200 |

Sabirnica 8 je napajana iz smjera sabirnice 1 koja je na 110 kilovoltnom naponskom nivou. Struja iz smjera sabirnice 1 se množi sa omjerom 110/35.

Najveći doprinos struji kratkog spoja (u svim slučajevima) ima mrežni izvor.

Ako se u obzir uzmu samo elementi sa rotirajućim dijelovima, najveći utjecaj ima generator 1 jer je smješten na toj sabirnici, a najmanji utjecaj ima motor.

Kada se isključi motor, struja kratkog spoja opadne za samo 6 A (vidi tablicu 4.8.), a kada se isključi samo generator 2 struja je manja za 13 A (vidi tablicu 4.9.). Ovako zanemarive struje su posljedica velike impedancije.

Generator 2 i motor su električki daleko od sabirnice na kojoj se dogodio kvar pa je i njihov utjecaj malen.

Isključivanjem generatora 1 struja kratkog spoja je manja za 1,649 kA (vidi tablicu 4.10.)

**Tab.4.8.** *Struja kratkog spoja sa uključenim i isključenim motorom*

| Struja na sabirnici 8 sa svim uključenim elementima [kA] | Struja na sabirnici 8 sa isključenim motorom [kA] |
|---|---|
| 9,200 | 9,194 |

**Tab.4.9** *Struja kratkog spoja sa uključenim i isključenim generatorom 2*

| Struja na sabirnici 8 sa svim uključenim elementima [kA] | Struja na sabirnici 8 sa isključenim generatorom 2 [kA] |
|---|---|
| 9,200 | 9,187 |

**Tab.4.10.** *Struja kratkog spoja sa uključenim i isključenim generatorom 1*

| Struja na sabirnici 8 sa svim uključenim elementima [kA] | Struja na sabirnici 8 sa isključenim generatorom 1 [kA] |
|---|---|
| 9,200 | 7,551 |

# 5. ZAKLJUČAK

Osim normalnih pogonskih stanja, u postrojenjima se često događaju poremećaji u radu. Da bi njihov utjecaj bio što manji, odnosno da ne bi došlo do pada napona ili čak prekida napajanja, potrebno je dimenzionirati opremu na način da ona bude što otpornija na različite poremećaje i da može isključiti kvar u što kraćem vremenskom roku. U današnje vrijeme sve je veća upotreba releja sa funkcijom APU (automatski ponovni uklop) koji omogućuju uklop nakon prolaznog kvara.

Ipak, najveći problem u postrojenjima su kratki spojevi koji nastaju kao posljedica udara groma, proboja izolacije i slično. Zbog velikih struja i elektromagnetskih sila koje djeluju prilikom kratkog spoja svi elementi moraju biti dimenzionirani tako da izdrže velika termička naprezanja i sile uslijed djelovanja velikih struja.

Na inženjerima elektroenergetike je da omoguće i osiguraju pravilan rad svih elemenata u postrojenju bez obzira na vanjske utjecaje. Prilikom proračuna treba voditi računa o impedancijama elemenata i o tome da li je kratki spoj električki blizu ili daleko od izvora.

Danas je inženjerima posao olakšan jer je razvijena računalna industrija pa postoje računalni programi za jednostavniji proračun struja kratkog spoja. U ovom radu je korišten programski paket Easy Power koji je znatno olakšao proračun.

Mreža koja je korištena je napajana samo jednom izvorom. U simulaciji su proučavana 3 scenarija. Za svaki scenarij su dobiveni različiti rezultati. Najveća struja kratkog spoja se pojavljuje u scenariju 3. Razlog tome je blizina mrežnog izvora mjestu kvara.

Uporabom programskih paketa kao što je Easy Power olakšan je proračun struja kratkog spoja i na relativno brz i jednostavan način se mogu planirati nove mreže i mogu se analizirati utjecaji različitih sklopnih stanja.

# 6. LITERATURA


1. H.Požar, Visokonaponska rasklopna postrojenja, IRO tehnička knjiga OOUR izdavačka djelatnost Zagreb, Jurišićeva 10, 1984.
2. M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže VI, FESB Split, 2008.
3. S.Nikolovski, D. Šljivac, Elektroenergetske mreže-zbirka riješenih zadataka, treće izdanje, Osijek, 2003.
4. L. Jozsa, Kratki spoj (dijelovi predavanja), Osijek, 2002.
5. M. Abačić, Kratki spojevi u mreži, http://mabacic.eios.hr/oo/ks.pdf
6. C. Preve, Protection of electrical network, ISTE Ltd 6 Fitzroy Square London W1T 5DX UK, 2006.
7. M. Padelin, Zaštita od Groma, Školska knjiga Zagreb, 1987.
8. B. de Metz-Noblat, F. Dumas, C. Poulain, Calculation of short-circuit currents, Schneider Electric, rujan 2005.
9. S. Nikolovski, T. Barić, P. Marić, Programski paketi za analizu i simulaciju rada elektroenergetskog sustava, Elektrotehnički fakultet Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2010.

# 7. SAŽETAK

U ovom radu su prikazane teorijske osnove i fizikalna slika kratkog spoja. Kao teorijska osnova prikazane su vrste kratkog spoja, uzroci, posljedice i struje kratkog spoja. Pod fizikalnom slikom se podrazumijeva udaljenost mjesta kvara od izvora što ima veliki utjecaj na struje. Kratki spoj je pojava koja ima veliki utjecaj u radu postrojenja i zbog toga je potrebno raditi proračune struja kratkog spoja. Kod proračuna je potrebni poznavati na koji način je moguće reducirati mrežu (Theveninov teorem). Glavni zadatak ovoga rada je proračun iz kojeg se može zaključiti koji element i koliko utječe na struje. Osim toga može se vidjeti kako mrežni izvor utječe na struje kratkog spoja. Da bi se izbjegle pogreške u proračunu do kojih može doći zbog ljudske nepažnje, u radu je korišten računalni program Easy Power u kojem je nacrtana radijalna mreža sa jednim izvorom napajanja i u kojem su dobiveni rezultati simulacije koji su prikazani u prilogu.

Ključne riječi: kratki spoj, Theveninov teorem, Easy power

# 8. SUMMARY

In this final thesis are described theoretical basics and physical image of short-circuit. Theoretical bases include short-circuit types, causes, consequences and short-circuit currents. Physical image means the distance from place where short circuit appeared to source and that has big influence on the currents. Short circuit has big influence on the operation on the plant and because of that is necessary to do short-circuit calculations. In calculation it is necessary to know how to reduce the network (Thevenin's theorem). The main task of this final thesis is calculation from which we can see which elemenet and how much it affects the current. Except that, we can see how source affects on the short-circuit currents. To avoid mistakes (because of human inattention), in this final is used computer program Easy Power. In this program is drawn radial network with single source and there are differents results which are shown in appendix.

Keywords: short-circuit, Thevenin's theorem, Easy power

# 9. ŽIVOTOPIS

Željko Lukač je rođen 13.8.1995. godine u Bruchsalu (Njemačka). Trenutno prebivalište je u Bosni i Hercegovini. Osnovnu školu je pohađao u Domaljevcu. Srednjoškolsko obrazovanje započinje 2011. godine upisom u gimnaziju Fra Martina Nedića u Orašju. 2014. godine završava srednju školu i prijavljuje se za ispite Državne mature. Nakon uspješnog polaganja mature, upisuje stručni studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku (smjer elektroenergetika). Član je IAESTE udruge. U slobodno vrijeme rekreativno igra nogomet.

# 10. PRILOG

**Tab.10.1.** *Naponi sabirnica*

| BUS | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| U (kV) | 110 | 35 | 35 | 10 | 10 | 35 | 35 | 35 | 6,6 |

**Tab.10.2.** *Parametri transformatora*

| | T1 i T2 | T3 | T4 | T5 |
|---|---|---|---|---|
| $U_1/U_2$ | 110/35 kV | 35/10 kV | 10/35 kV | 10/6.6 |
| $S_n$ [MVA] | 63 | 8 | 16 | 45 |
| $P_{cu}$ [kW] | 120 | 32 | 48 | 23 |
| $u_{k\%}$ [%] | 10.5 | 4,6 | 7 | 6 |
| Spoj | Yy0 | Yy0 | Yy0 | Yy0 |

**Tab.10.3.** *Parametri kabela*

| Kabel | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| [km] | 8 | 10 | 12 |
| I [kA] | 1,25 | 1,5 | 0,68 |
| $R_1$ [Ω/km] | 0,03 | 0,215 | 0,084 |
| $X_1$ [Ω/km] | 0,33 | 0,916 | 0,42 |
| $X_c$ [Ω /km] | 11,4 | 0,2895 | 0,37 |
| $R_0$ [Ω/km] | 0,18 | 0,365 | 0,234 |
| $X_0$ [MΩ/km] | 0,48 | 1,056 | 0,57 |
| $X_{c0}$ [MΩ /km] | 0,32 | 0,4395 | 0,52 |

**Tab.10.4.** *Parametri generatora*

| Generator | G1 | G2 |
|---|---|---|
| Un [kV] | 35 | 10 |
| X˝d [%] | 10 | 10 |
| X´d [%] | 10 | 10 |

| | | |
|---|---|---|
| Xi [%] | 10 | 10 |
| Sg [MVA] | 10 | 5 |

**Tab.10.5.** *Parametri potrošača*

| Potrošač | L1 | L2 |
|---|---|---|
| $P_1$[MW] | 12 | 6 |
| Q1[MVAr] | 7.4 | 4.5 |

**Tab.10.6.** *Parametri motora*

| $S_n$ [kVA] | $P_n$ [kW] | $U_n$ [kV] | n [$min^{-1}$] | cosφ | Ɲ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1291,47 | 1120 | 6,6 | 2963 | 0,91 | 0,85 |

a) Sabirnica 3

**Tab.10.7.** *Uključeni svi elementi (struje kratkog spoja)*

| Struja na sabirnici 3 [kA] | Napajano iz smjera sabirnice 2 [kA] | Napajano iz smjera sabirnice 4 [kA] |
|---|---|---|
| 6,087 | 5,709 | 0,108 |
| | Doprinos izvora [kA] | 5,462 |
| | Doprinos generatora 1 [kA] | 0,246 |
| | Doprinos generatora 2 [kA] | 0,252 |
| | Doprinos motora [kA] | 0,127 |

**Tab.10.8.** *Uključeni svi elementi (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-2 | 0,250 |
| BUS-4 | 0,132 |

| | |
|---|---|
| BUS-7 | 0,697 |
| BUS-8 | 0,851 |

**Tab.10.9.** *Isključen motor (struje)*

| Struja na sabirnici 3 | Napajano iz smjera sabirnice 2 | Napajano iz smjera sabirnice 4 |
|---|---|---|
| 5,971 | 5,709 | 0,075 |
| | Doprinos izvora | 5,462 |
| | Doprinos generatora 1 | 0,246 |
| | Doprinos generatora 2 | 0,263 |
| | Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.10.** *Isključen motor (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-2 | 0,250 |
| BUS-4 | 0,092 |
| BUS-7 | 0,683 |
| BUS-8 | 0,851 |

**Tab.10.11.** *Uključen generator 1, a isključeni motor i generator 2 (struje)*

| Struja na sabirnici 3 | Napajano iz smjera sabirnice 2 | Napajano iz smjera sabirnice 4 |
|---|---|---|
| 5,709 | 5,709 | 0 |
| | Doprinos izvora | 5,462 |
| | Doprinos generatora 1 | 0,246 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |

| | |
|---|---|
| Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.12.** *Uključen generator 1, a isključeni motor i generator 2 (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-2 | 0,250 |
| BUS-4 | 0 |
| BUS-7 | 0 |
| BUS-8 | 0,851 |

**Tab.10.13.** *Uključen generator 2, a isključeni motor i generator 1 (struje)*

| Struja na sabirnici 3 | Napajano iz smjera sabirnice 2 | Napajano iz smjera sabirnice 4 |
|---|---|---|
| 5,927 | 5,665 | 0,075 |
| | Doprinos izvora | 5,663 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |
| | Doprinos generatora 2 | 0,263 |
| | Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.14.** *Uključen generator 2, a isključeni motor i generator 1 (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-2 | 0,248 |
| BUS-4 | 0,092 |
| BUS-7 | 0,683 |
| BUS-8 | 0,820 |

**Tab.10.15.** *Generatori isključeni, a motor uključen (struje)*

| Struja na sabirnici 3 | Napajano iz smjera sabirnice 2 | Napajano iz smjera sabirnice 4 |
|---|---|---|
| 5,804 | 5,665 | 0,039 |
| | Doprinos izvora | 5,663 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |
| | Doprinos motora | 0,139 |

**Tab.10.16.** *Generatori isključeni, a motor uključen (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-2 | 0,248 |
| BUS-4 | 0,049 |
| BUS-7 | 0,049 |
| BUS-8 | 0,820 |

**Tab.10.17.** *Uključen motor i generator 1, a generator 2 isključen (struje)*

| Struja na sabirnici 3 | Napajano iz smjera sabirnice 2 | Napajano iz smjera sabirnice 4 |
|---|---|---|
| 5,848 | 5,709 | 0,039 |
| | Doprinos izvora | 5,462 |
| | Doprinos generatora 1 | 0,246 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |
| | Doprinos motora | 0,139 |

**Tab.10.18.** *Uključen motor i generator 1, a generator 2 isključen (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-2 | 0,250 |
| BUS-4 | 0,049 |
| BUS-7 | 0,049 |
| BUS-8 | 0,851 |

**Tab.10.19.** *Uključen motor i generator 2, a generator 1 isključen (struje)*

| Struja na sabirnici 3 | Napajano iz smjera sabirnice 2 | Napajano iz smjera sabirnice 4 |
|---|---|---|
| 6,043 | 5,665 | 0,108 |
| | Doprinos izvora | 5,663 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |
| | Doprinos generatora 2 | 0,252 |
| | Doprinos motora | 0,127 |

**Tab.10.20.** *Uključen motor i generator 2, a generator 1 isključen (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-2 | 0,248 |
| BUS-4 | 0,132 |
| BUS-7 | 0,697 |
| BUS-8 | 0,820 |

**Tab.10.21.** *Svi elementi isključeni (struje)*

| Struja na sabirnici 3 | Napajano iz smjera sabirnice 2 | Napajano iz smjera sabirnice 4 |
|---|---|---|
| 5,665 | 5,665 | 0 |

| | |
|---|---|
| Doprinos izvora | 5,663 |
| Doprinos generatora 1 | 0 |
| Doprinos generatora 2 | 0 |
| Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.22.** *Svi elementi isključeni (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-2 | 0,248 |
| BUS-4 | 0 |
| BUS-7 | 0 |
| BUS-8 | 0,820 |

b) Sabirnica 7

**Tab.10.23.** *Svi elementi uključeni (struje)*

| Struja na sabirnici 7 | Napajano iz smjera sabirnice 6 | |
|---|---|---|
| 1,188 | 0,366 | |
| | Doprinos izvora | 0,327 |
| | Doprinos generatora 1 | 0,015 |
| | Doprinos generatora 2 | 0,824 |
| | Doprinos motora | 0,026 |

**Tab.10.24.** *Svi elementi uključeni (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-3 | 0,941 |

| | |
|---|---|
| BUS-6 | 0,031 |
| BUS-8 | 0,991 |

**Tab.10.25.** *Uključeni generatori, a motor isključen (struje)*

| Struja na sabirnici 7 | Napajano iz smjera sabirnice 6 | |
|---|---|---|
| 1,183 | 0,361 | |
| | Doprinos izvora | 0,346 |
| | Doprinos generatora 1 | 0,016 |
| | Doprinos generatora 2 | 0,824 |
| | Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.26.** *Uključeni generatori, a motor isključen (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-3 | 0,937 |
| BUS-6 | 0,031 |
| BUS-8 | 0,991 |

**Tab.10.27.** *Uključen generator 1, a generator 2 i motor isključeni (struje)*

| Struja na sabirnici 7 | Napajano iz smjera sabirnice 6 | |
|---|---|---|
| 0,361 | 0,361 | |
| | Doprinos izvora | 0,346 |
| | Doprinos generatora 1 | 0,016 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |
| | Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.28.** *Uključen generator 1, a generator 2 i motor isključeni (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-3 | 0,937 |
| BUS-6 | 0,031 |
| BUS-8 | 0,991 |

**Tab.10.29.** *Uključen generator 2, a motor i generator 1 isključeni (struje)*

| Struja na sabirnici 7 | Napajano iz smjera sabirnice 6 | |
|---|---|---|
| 1,183 | 0,361 | |
| | Doprinos izvora | 0,361 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |
| | Doprinos generatora 2 | 0,824 |
| | Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.30.** *Uključen generator 2, a motor i generator 1 isključeni (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-3 | 0,937 |
| BUS-6 | 0,031 |
| BUS-8 | 0,988 |

**Tab.10.31.** *Uključen motor, a generatori isključeni (struje)*

| Struja na sabirnici 7 | Napajano iz smjera sabirnice 6 | |
|---|---|---|
| 0,366 | 0,366 | |
| | Doprinos izvora | 0,339 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |

| | |
|---|---|
| Doprinos generatora 2 | 0 |
| Doprinos motora | 0,026 |

**Tab.10.32.** *Uključen motor, a generatori isključeni (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-3 | 0,940 |
| BUS-6 | 0,031 |
| BUS-8 | 0,989 |

**Tab.10.33.** *Uključen motor i generator 1, a generator 2 isključen (struje)*

| Struja na sabirnici 7 | Napajano iz smjera sabirnice 6 | |
|---|---|---|
| 0,366 | 0,366 | |
| | Doprinos izvora | 0,327 |
| | Doprinos generatora 1 | 0,015 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |
| | Doprinos motora | 0,026 |

**Tab.10.34.** *Uključen motor i generator 1, a isključen generator 2 (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-3 | 0,941 |
| BUS-6 | 0,031 |
| BUS-8 | 0,991 |

**Tab.10.35.** *Uključen motor i generator 2, a isključen generator 1 (struje)*

| Struja na sabirnici 7 | Napajano iz smjera sabirnice 6 | |
|---|---|---|
| 1,188 | 0,366 | |
| | Doprinos izvora | 0,339 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |
| | Doprinos generatora 2 | 0,824 |
| | Doprinos motora | 0,026 |

**Tab.10.36.** *Uključen motor i generator 2, a isključen generator 1 (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-3 | 0,940 |
| BUS-6 | 0,031 |
| BUS-8 | 0,989 |

**Tab.10.37.** *Isključeni svi elementi (struje)*

| Struja na sabirnici 7 | Napajano iz smjera sabirnice 6 | |
|---|---|---|
| 0,361 | 0,361 | |
| | Doprinos izvora | 0,361 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |
| | Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.38.** *Isključeni svi elementi (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-3 | 0,937 |
| BUS-6 | 0,031 |
| BUS-8 | 0,988 |

c) Sabirnica 8

**Tab.10.39.** *Uključeni svi elementi (struje)*

| Struja na sabirnici 8 | Napajano iz smjera sabirnice 1 | |
|---|---|---|
| 9,200 | 4,874 | |
| | Doprinos izvora | 7,464 |
| | Doprinos generatora 1 | 1,649 |
| | Doprinos generatora 2 | 0,057 |
| | Doprinos motora | 0,029 |

**Tab.10.40.** *Uključeni svi elementi (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-1 | 0,763 |
| BUS-3 | 0,775 |
| BUS-7 | 0,931 |

**Tab.10.41.** *Uključeni generatori, a motor isključen (struje)*

| Struja na sabirnici 8 | Napajano iz smjera sabirnice 1 | |
|---|---|---|
| 9,194 | 4,856 | |

| | |
|---|---|
| Doprinos izvora | 7,483 |
| Doprinos generatora 1 | 1,649 |
| Doprinos generatora 2 | 0,061 |
| Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.42.** *Uključeni generatori, a motor isključen (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-1 | 0,762 |
| BUS-3 | 0,771 |
| BUS-7 | 0,926 |

**Tab.10.43.** *Uključen generator 1, a isključen motor i generator 2 (struje)*

| Struja na sabirnici 8 | Napajano iz smjera sabirnice 1 | |
|---|---|---|
| 9,179 | 4,812 | |
| | Doprinos izvora | 7,530 |
| | Doprinos generatora 1 | 1,649 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |
| | Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.44.** *Uključen generator 1, a isključen motor i generator 2 (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-1 | 0,761 |
| BUS-3 | 0,761 |
| BUS-7 | 0,761 |

**Tab.10.45.** *Uključen generator 2, a isključeni motor i generator 1 (struje)*

| Struja na sabirnici 8 | Napajano iz smjera sabirnice 1 | |
|---|---|---|
| 7,545 | 4,856 | |
| | Doprinos izvora | 7,483 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |
| | Doprinos generatora 2 | 0,061 |
| | Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.46.** *Uključen generator 2, a isključeni motor i generator 1 (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-1 | 0,762 |
| BUS-3 | 0,771 |
| BUS-7 | 0,926 |

**Tab.10.47.** *Uključen motor, a generatori isključeni (struje)*

| Struja na sabirnici 8 | Napajano iz smjera sabirnice 1 | |
|---|---|---|
| 7,539 | 4,837 | |
| | Doprinos izvora | 7,505 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |
| | Doprinos motora | 0,033 |

**Tab.10.48.** *Uključen motor, a generatori isključeni (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-1 | 0,762 |
| BUS-3 | 0,766 |
| BUS-7 | 0,778 |

**Tab.10.49.** *Uključen motor i generator 1, a generator 2 isključen (struje)*

| Struja na sabirnici 8 | Napajano iz smjera sabirnice 1 | |
|---|---|---|
| 9,187 | 4,837 | |
| | Doprinos izvora | 7,505 |
| | Doprinos generatora 1 | 1,649 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |
| | Doprinos motora | 0,033 |

**Tab.10.50.** *Uključen motor i generator 1, a generator 2 isključen (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-1 | 0,762 |
| BUS-3 | 0,766 |
| BUS-7 | 0,778 |

**Tab.10.51.** *Uključen motor i generator 2, a generator 1 isključen (struje)*

| Struja na sabirnici 8 | Napajano iz smjera sabirnice 1 | |
|---|---|---|
| 7,551 | 4,875 | |
| | Doprinos izvora | 7,464 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |

| | |
|---|---|
| Doprinos generatora 2 | 0,057 |
| Doprinos motora | 0,029 |

**Tab.10.52.** *Uključen motor i generator 2, a generator 1 isključen (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-1 | 0,763 |
| BUS-3 | 0,775 |
| BUS-7 | 0,931 |

**Tab.10.53.** *Svi elementi isključeni (struje)*

| Struja na sabirnici 8 | Napajano iz smjera sabirnice 1 | |
|---|---|---|
| 7,531 | 4,812 | |
| | Doprinos izvora | 7,530 |
| | Doprinos generatora 1 | 0 |
| | Doprinos generatora 2 | 0 |
| | Doprinos motora | 0 |

**Tab.10.54.** *Svi elementi isključeni (naponi)*

| Sabirnica | Napon [p.u.] |
|---|---|
| BUS-1 | 0,761 |
| BUS-3 | 0,761 |
| BUS-7 | 0,761 |