

Proračun kratkog spoja u istosmjernim krugovima

Beljan, Alan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:190:304648>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

Proračun kratkog spoja u istosmjernim krugovima

Rijeka, srpanj 2022.

Alan Beljan

0069083437

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

Proračun kratkog spoja u istosmjernim krugovima

Mentor: prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, srpanj 2022.

Alan Beljan

0069083437

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE**

Rijeka, 11. ožujka 2021.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Električna postrojenja**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

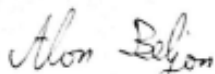
Pristupnik: **Alan Beljan (0069083437)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike**

Zadatak: **Proračun kratkog spoja u istosmjernim krugovima / Short-circuit calculation in DC installations**

Opis zadatka:

Sekundarni sustavi električnih postrojenja napajaju se iz stabilnih postrojenja za proizvodnju istosmjernog napona. Kao i u izmjeničnim krugovima i u istosmjernim krugovima su mogući kvarovi i posljedično kratki spojevi. U radu je potrebno prikazati metodologiju proračuna struje kratkog spoja u istosmjernim krugovima. Za jedan konkretan podsustav istosmjernog razvoda napajanja izvršiti proračun kratkog spoja.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

Izjava

Sukladno članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskog sveučilišnog studija/stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku preuzetom 15. ožujka 2021.

Rijeka, 11. srpnja 2022.

Potpis: Alen Bejan

Sadržaj

1	Uvod.....	6
2	Općenito.....	7
3	Struja kratkog spoja iz elemenata	11
3.1	Struja kratkog spoja iz kondenzatora.....	11
3.2	Struja kratkog spoja napajana iz baterije.....	14
3.3	Struja kratkog spoja napajana iz ispravljača.....	15
3.4	Struja kratkog spoja napajana iz motora s nezavisnom uzbuđom.....	18
4	Ukupna struja kratkog spoja	22
5	Numerički primjer.....	26
5.1	Shema i tipovi prekidača	26
5.2	Ulazni podaci za proračun	28
5.3	Rješenja	31
6	Zaključak.....	32
	Popis slika	33
	Popis tablica	33
	Sažetak	34
	Abstract	34
	Literatura	35

1 Uvod

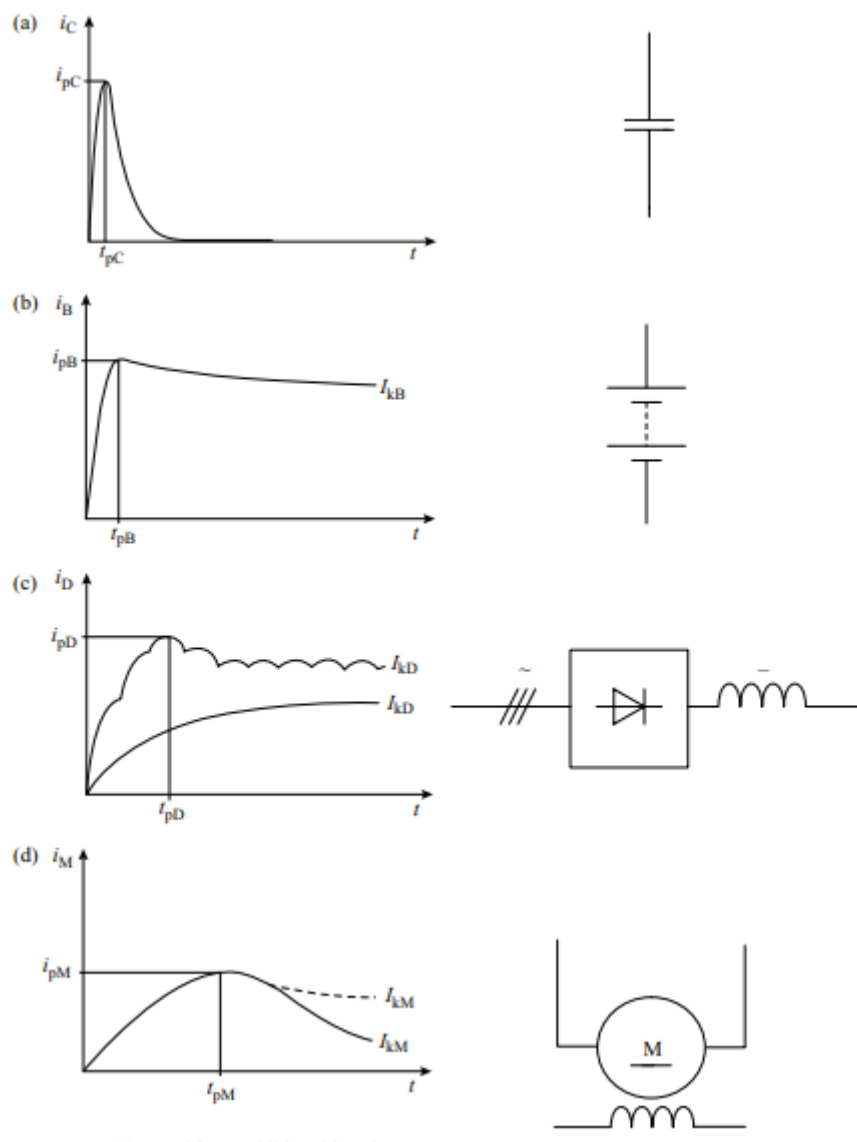
Elektroenergetski sustavi osmišljeni su s namjerom za prenošenje električne energije do potrebnih mjesta, potrošača, gdje se koristi električna energija. Proces prijenosa električne energije najčešće započinje u generatorima električne gdje generatori pretvaraju različite oblike energije u električnu energiju, koja se kasnije predaje u elektroenergetske sustave. Nažalost, ništa nije idealno i savršeno, u elektroenergetskim sustavima dolazi do različitih kvarova koji najčešće rezultiraju pojavom struje kratkog spoja. Najjednostavnije rečeno kratki spoj u teoriji je spoj u kojem je faza i nula, zemlja, izvora izravno spojeno. Ako se bolje promisli o tome što se događa kada se spoji izvor na ranije opisani način i pogleda Ohmov zakon može se primijetiti da ako napon djeluje u spoju s jako malim otporom dobit će se velika struja. Ako velika struja teče kroz vodiče i elektroenergetski sustav vrlo je vjerojatno da će doći do oštećenja. Ovo je bio jedan jednostavan opis struje kratkog spoja, ali problem kod elektroenergetskih sustava je složenost tih sustava i njihova cijena. Dakle, ako bi se dogodila oštećenja zbog struje kratkog spoja dogodila bi se velika šteta, koju je potrebno izbjeći ako je ikako moguće i upravo iz tog razloga kod projektiranja elektroenergetskih sustava mora se uzeti u obzir struja kratkog spoja i kako zaštititi sustav od struje kratkog spoja.

2 Općenito

Proračun struje kratkog spoja u istosmjernim krugovima obrađen je u normi IEC 61660-1. Suprotno od pristupa za proračun struje kratkog spoja u trofaznim izmjeničnim sustavima, kod istosmjernih sustava potreban nam je tijek stvaranja struje kratkog spoja uz izračunate definirane parametre dijela mreže u kojem se kratki spoj dogodio. Elementi koji pridonose struji kratkog spoja u istosmjernim mrežama su:

- Kondenzatori za smanjenje valovitosti struje u mreži
- Stacionarne baterije (najčešće olovne baterije)
- Ispravljači (norma 61660-1 se bavi samo s ispravljačima u trofaznom mosnom spoju za frekvenciju 50 Hz)
- Istosmjerni motori s nezavisnom uzbudom

Grane struja kratkog spoja iz ranije spomenutih elemenata opisuju se različitim vremenskim tijekom struje kratkog spoja ovisno o omskom, induktivnom i kapacitivnom otporu istosmjernog izvora ili elemenata koji se nalaze u istosmjernoj mreži. Slika 2.1 prikazuje ekvivalentne dijagrame elemenata i tipični tijek struje kratkog spoja za elemente u istosmjernoj mreži.



Slika 2.1. Ekvivalentni dijagram elemenata u istosmjernim mrežama i tipični tijek struje kratkog spoja (a - kondenzator, b - baterija, c - ispravljač u trofaznom mosnom spoju, d - istosmjerni motor s nezavisnom uzбудom)

Istosmjerne instalacije u pomoćnim sustavima napajanja uključuju nekoliko dijelova opreme; ukupna struja kratkog spoja na mjestu kratkog spoja je superpozicija svih pojedinih struja kratkog spoja u zasebnim grana istosmjerne mreže. U principu, struja kratkog spoja može se definirati s:

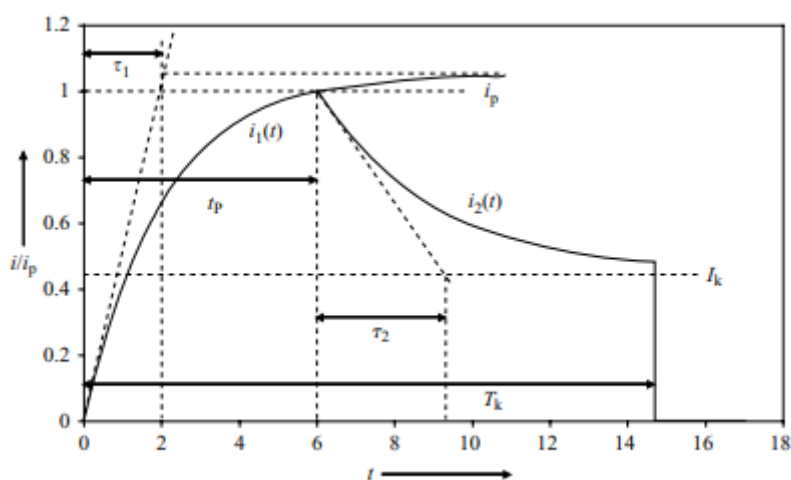
- vremenskom funkcijom $i_1(t)$ koja prikazuje porast struje kratkog spoja
- vremenom porasta struje kratkog spoja t_p
- Maksimalnom strujom kratkog spoja i_p
- vremenskom funkcijom $i_2(t)$ koja prikazuje pad struje kratkog spoja do vrijednosti I_K
- kvazi stacionarna struja kratkog spoja I_K

Vremenske funkcije mogu se izračunati prema sljedećim izrazima:

$$i_1(t) = i_p \cdot \frac{1 - e^{-t/\tau_1}}{1 - e^{-t_p/\tau_1}} \quad \text{za } 0 \leq t \leq t_p \quad (2.1)$$

$$i_2(t) = i_p \left(\left(1 - \frac{I_k}{i_p} \right) \cdot e^{-(t-t_p)/\tau_2} + \frac{I_k}{i_p} \right) \quad (2.2)$$

Ako nema maksimuma struje kratkog spoja, maksimalna struja kratkog spoja i_p i kvazi stacionarna struja kratkog spoja I_k su jednake. Vremenski tijek prikazan je na standardnoj aproksimaciji prikazanoj na slici 2.2.



Slika 2.2. Standardna aproksimacija funkcije struje kratkog spoja

Postupak računanja parametara i_p i I_k , vremenskih konstanti τ_1 , τ_2 i vremena porasta struje kratkog spoja t_p je:

- Parametri struje kratkog spoja se računaju zasebno za svaku granu, tj. za svaki element koji doprinosi struji kratkog spoja
- U slučaju više različitih izvora, parametri kratkog spoja izračunat će se superpozicijom grana struje kratkog spoja:
 - Izračun grane struje kratkog spoja uzimajući u obzir zajedničku granu
 - Korekciju grane struje kratkog spoja za faktor σ , koji ovisi o otporu grane
 - Izračun vremena porasta struje kratkog spoja grane sa ispravljenim (korigiranim) impedancijama

- Superpoziciju izračunatih funkcija za granu struje kratkog spoja pri određivanju ukupne struje kratkog spoja
- Toplinski i elektromagnetski efekti struje kratkog spoja računaju se prema standardnim aproksimacijskim funkcijama

Za proračun maksimalne struje kratkog spoja u istosmjernim mrežama trebaju se uzeti u obzir sljedeće pretpostavke:

- Impedancija kratkog spoja mora biti minimalna (Z_{Qmin}), tako da je doprinos struji kratkog spoja maksimalan
- Otpor vodiča se računa za temperaturu od 20 °C
- Potrebno je uzeti u obzir najgori mogući slučaj kratkoga spoja (slučaj u kojem je moguća najveća maksimalna struja kratkog spoja)
- Otpor sabirnica treba zanemariti
- Regulacijski krugovi za ograničavanje doprinosa ispravljača su isključeni, tj. ograničenja nisu aktivna
- Baterije su napunjene
- Sustavi povezani diodama se smatraju direktno povezanim

Za proračun minimalne struje kratkog spoja u istosmjernim mrežama trebaju se uzeti u obzir sljedeće pretpostavke:

- Impedancija kratkog spoja mora biti maksimalna (Z_{Qmax}), tako da je doprinos struji kratkog spoja minimalan
- Potrebno je uzeti u obzir slučaj kratkoga spoja koji vodi do najmanje struje kratkog spoja
- Otpor vodiča mora se izračunati za najveću dopuštenu temperaturu na kojoj neće doći do oštećenja vodiča
- Otpor sabirnica treba uzeti u obzir
- Doprinos ispravljača struji kratkog spoja je ograničen nazivnom strujom
- Napon baterije treba se definirati kao minimalni napon pražnjenja prema uputama proizvođača baterije
- Sustavi povezani diodama se smatraju odspojenim

Tako određene minimalne i maksimalne struje kratkog spoja potrebno je uzeti u obzir prilikom izbora osigurača i razvodnih uređaja u istosmjernim mrežama.

3 Struja kratkog spoja iz elemenata

3.1 Struja kratkog spoja iz kondenzatora

Kvazi stacionarna struja kratkog spoja kondenzatora je 0.

$$I_{kC} = 0 \quad (3.1)$$

Maksimalna struja kratkog spoja i_{pC} je proračunata prema sljedećem izrazu:

$$i_{pC} = \kappa_C \cdot \frac{E_C}{R_{CBr}} \quad (3.2)$$

pri čemu je E_C napon kondenzatora u trenutku nastanka kratkog spoja, a R_{CBr} otpor kondenzatora uključujući otpor vodiča i zajedničkih grana mreže.

Faktor κ_C ovisi o vlastitoj frekvenciji ω_0 :

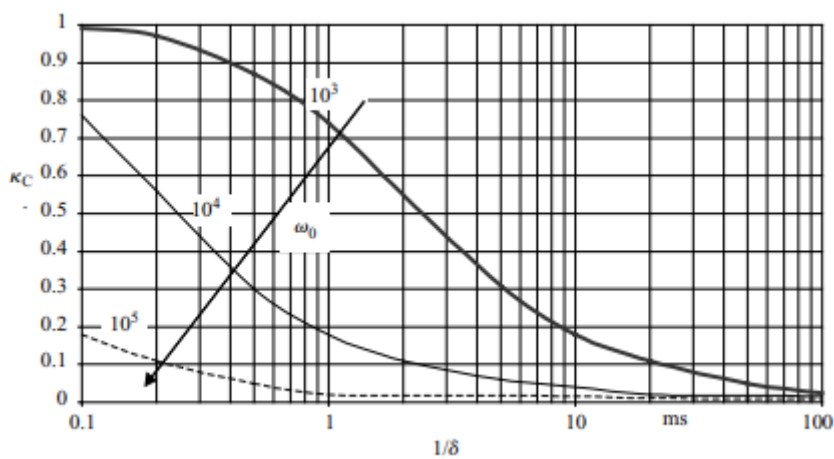
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr} \cdot C}} \quad (3.3)$$

i faktoru prigušenja δ

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2 \cdot L_{CBr}}{R_{CBr}} \quad (3.4)$$

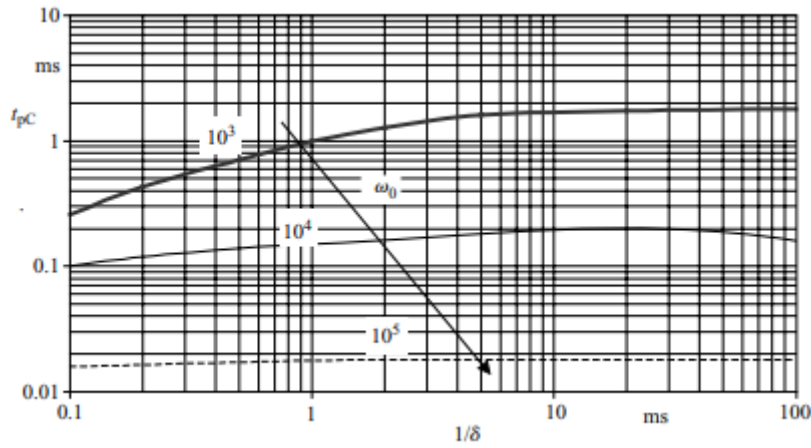
pri čemu je L_{CBr} induktivitet vodiča koji se nalaze u mreži.

Uobičajen raspon vrijednosti κ_C prikazan je na slici 3.1



Slika 3.1. Faktor κ_C za izračun maksimalne struje kratkog spoja kondenzatora

Vrijeme porasta struje kratkog spoja t_{pC} također ovisi o vlastitoj frekvenciji ω_0 i faktoru opadanja δ . Uobičajen raspon vrijednosti t_{pC} prikazan je na slici 3.2.



Slika 3.2. Vrijeme porasta t_{pC} za izračun struja kratkog spoja kondenzatora

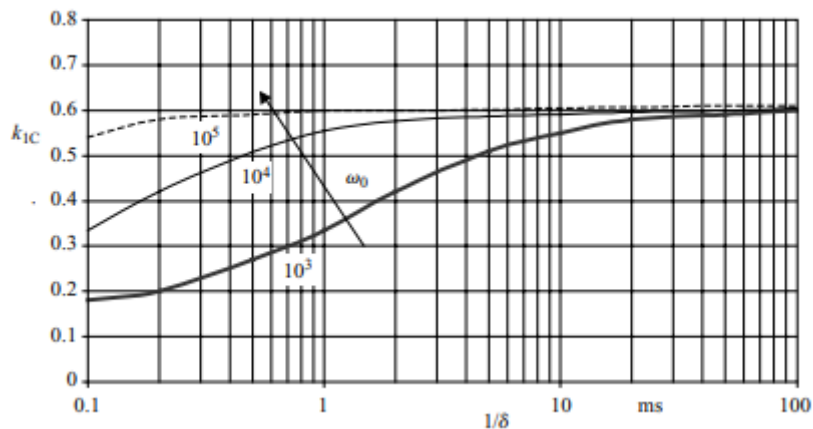
Vremenska konstanta porasta τ_{1C} glasi:

$$\tau_{1C} = k_{1C} \cdot t_{pC} \quad (3.5)$$

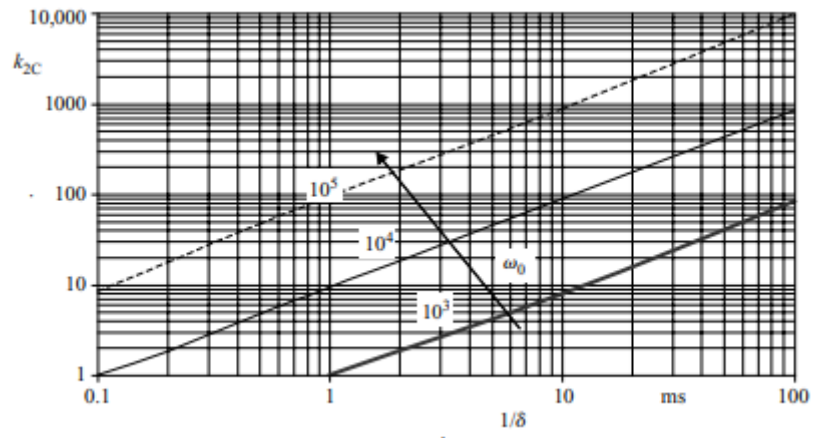
Vremenska konstanta opadanja τ_{2C} glasi:

$$\tau_{2C} = k_{2C} \cdot R_{CBrr} \cdot C \quad (3.6)$$

Obje vremenske konstante ovise o faktorima k_{1C} i k_{2C} , tj. ovise o vlastitoj frekvenciji i faktoru prigušenja. Uobičajeni raspon vrijednosti prikazan je na slikama 3.3 i 3.4.



Slika 3.3. Faktor k_{1C} za izračun konstante faktora porasta



Slika 3.4. Faktor k_{2C} za izračun konstante faktora opadanja

3.2 Struja kratkog spoja napajana iz baterije

Vremenska konstanta porasta struje kratkog spoja baterija je uvijek manja od 100 ms, pa se kvazi stacionarna struja kratkog spoja I_k računa jednu sekundu nakon nastanka kratkog spoja.

$$I_{kB} = \frac{0.95 \cdot E_B}{R_{BBr} + 0.1 \cdot R_B} \quad (3.7)$$

pri čemu je:

E_B - napon baterije

R_{BBr} - otpor baterije i vodiča

R_B - otpor napunjene baterije

Maksimalna struja kratkog spoja i_{pB} se računa uz pomoć napona baterije E_B prema:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} \quad (3.8)$$

Uobičajen raspon vrijednosti za vremenski konstantu porasta τ_{1B} i vremena porasta t_{pB} glasi:

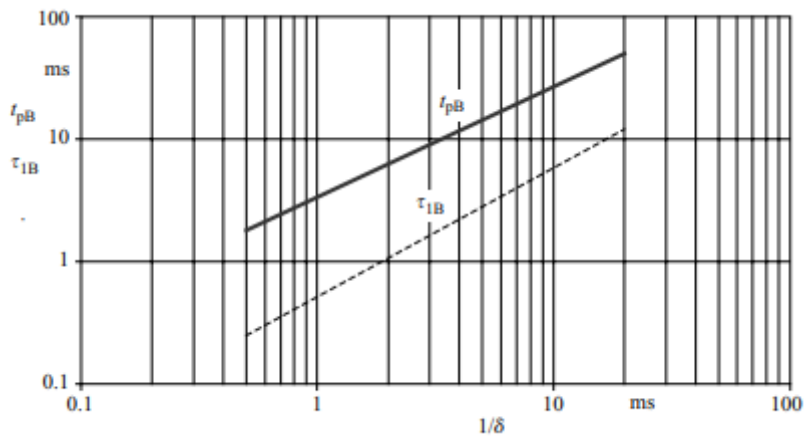
$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} \quad (3.9)$$

pri čemu je:

L_{BBr} – induktivitet baterije uključujući vodiče i zajedničke grane

T_B - vremenska konstanta baterije, pretpostavljeno $T_B = 30 \text{ ms}$

τ_{2B} – vremenska konstanta prigušenja, pretpostavljeno $\tau_{2B} = 100 \text{ ms}$



Slika 3.5. Vremenska konstanta porasta τ_{1B} i vrijeme maksimuma t_{pB} pri struji kratkog spoja baterije

3.3 Struja kratkog spoja napajana iz ispravljača

Kvazi stacionarna struja kratkog spoja I_{kD} ispravljača u trofaznom mosnom spoju glasi:

$$I_{kD} = \lambda_D \cdot \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_N} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \quad (3.10)$$

pri čemu je:

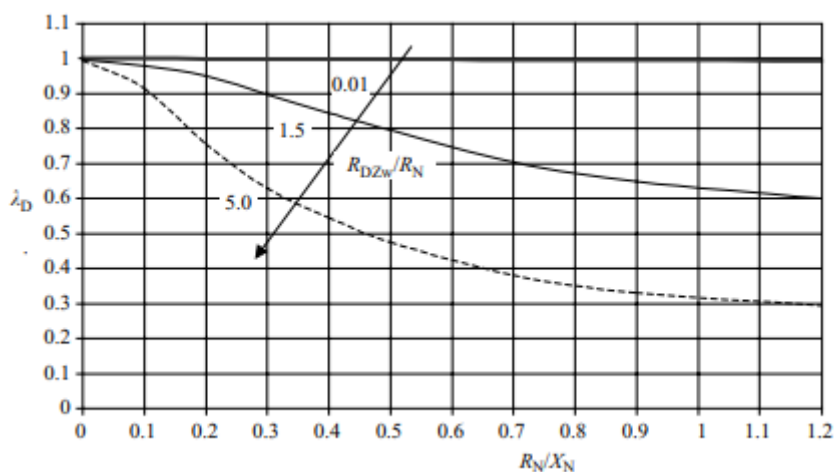
U_n - nazivni napon izmjenične strane ispravljača

Z_N - impedancija izmjenične strane ispravljača

U_{rTLV} - nazivni napon na niženaponskoj strani transformatora

U_{rTHV} - nazivni napon na višenaponskoj strani transformatora

Faktor λ_D ovisi o omjeru $\frac{R_N}{X_N}$ izmjenične strane ispravljača, ali također ovisi o omjeru otpora istosmjernje i izmjenične strane ispravljača. Uobičajen raspon vrijednosti faktora λ_D prikazan je na slici 3.6.

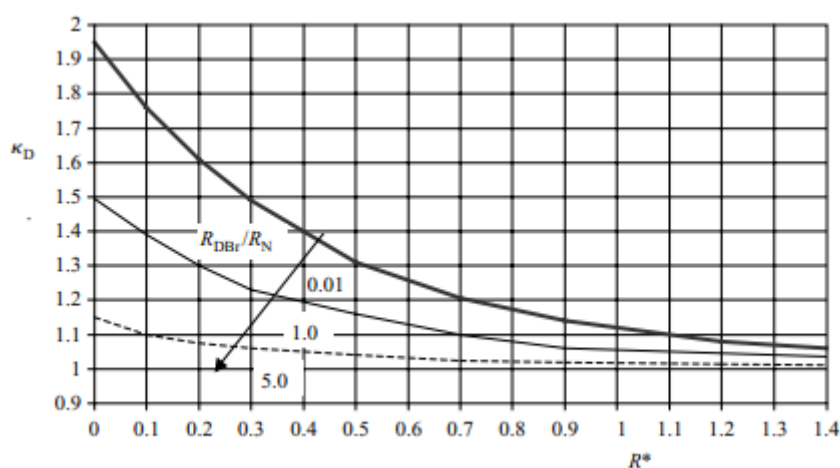


Slika 3.6. Faktor λ_D za izračun kvazi stacionarne struje kratkog spoja ispravljača

Maksimalna struja kratkog spoja računa se prema izrazu:

$$\dot{i}_{pD} = \kappa_D \cdot I_{kD} \quad (3.11)$$

pri čemu faktor κ_D ovisi o odnosu induktiviteta $\frac{L_{DBr}}{L_N}$, omjer induktiviteta istosmjerne strane prema izmjeničnoj strani, otpora i reaktancije R_N, R_{BBr} i X_N . Uobičajen raspon vrijednosti faktora κ_D prikazan je na slici 3.7.



Slika 3.7. Faktor κ_D za izračun maksimalne struje kratkog spoja ispravljača

U slučaju kada je $\kappa_D < 1.0$ neće se pojaviti maksimalna struja kratkog spoja jer se maksimalna struja kratkog spoja može zanemariti s obzirom da će kvazi stacionarna struja kratkog

spoja imati najveću vrijednost. Vrijeme maksimuma t_{pD} kada je $\kappa_D < 1.05$ jednako je vremenu trajanja kratkog spoja T_k . Za sve ostale slučajeve ($\kappa_D > 1.05$) vrijeme maksimuma određuje se:

$$t_{pD} = (3 \cdot \kappa_D + 6) \text{ ms} \quad \text{za} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} \leq 1 \quad (3.12)$$

$$t_{pD} = \left((3 \cdot \kappa_D + 6) + 4 \left(\frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right) \text{ ms} \quad \text{za} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} > 1 \quad (3.13)$$

Vremenska konstanta porasta τ_{1D} za ispravljачe napajane s 50 Hz iznosi:

$$\tau_{1D} = \left(2 + (\kappa_D - 0.9) \cdot \left(2.5 + 9 \cdot \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right) \text{ ms} \quad \text{za} \quad \kappa_D \geq 1.05 \quad (3.14)$$

$$\tau_{1D} = \left(0.7 + \left(7 - \frac{R_N}{X_N} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right) \right) \cdot \left(0.1 + 0.2 \cdot \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \text{ ms} \quad \text{za} \quad \kappa_D < 1.05 \quad (3.15)$$

Prikladna aproksimacija, koja daje konzervativne rezultate dana je sljedećim izrazom:

$$\tau_{1D} = \frac{t_{pD}}{3} \quad (3.16)$$

Vremenska konstanta prigušenja τ_{2D} za 50 Hz računa se prema sljedećem izrazu:

$$\tau_{2D} = \frac{2}{\frac{R_N}{X_N} \cdot \left(0.6 + 0.9 \cdot \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)} \text{ ms} \quad (3.17)$$

pri čemu je:

X_N - reaktancija sustava N (izmjenična strana), $X_N = \omega L_N$

R_N - otpornost sustava N (izmjenična strana)

R_{DBr} - otpornost istosmjerne strane sustava uključujući vodiče i zajedničke grane

L_{DBr} - induktivitet istosmjerne strane sustava uključujući vodiče i zajedničke grane

3.4 Struja kratkog spoja napajana iz motora s nezavisnom uzбудom

Struja kratkog spoja iz istosmjernog motora s nezavisnom uzбудom uzima se u obzir samo ako je ukupna suma nazivnih struja svih istosmjernih motora veća od 1% struje kratkog spoja jednog ispravljača.

$$I_{kM} = \frac{L_F}{L_{OF}} \cdot \left(\frac{U_{rM} - I_{rM} \cdot R_M}{R_{MBr}} \right) \quad (3.18)$$

pri čemu je:

U_{rM} - nazivni napon

I_{rM} - nazivna struja

L_F – zasićeni induktivitet uzbuđnog namota u kratkom spoju

L_{OF} – nezasićeni induktivitet uzbuđnog namota u praznom hodu

Jednadžba 3.18 vrijedi samo ako je brzina vrtnje motora konstantna tijekom trajanja kratkog spoja. Kada brzina vrtnje motora padne na nulu kvazi stacionarna struja kratkog spoja jednaka je nuli ($I_{kM} = 0$). Mehanička vremenska konstanta τ_{Mec} , vremenska konstanta uzbuđnog namota τ_F i armaturnog namota τ_M određuju maksimalnu struju kratkog spoja i_{pM} :

$$i_{pM} = \kappa_M \cdot \frac{U_{rM} - I_{rM} \cdot R_M}{R_{MBr}} \quad (3.19)$$

Faktor κ_M jednak je jedan u slučaju nazivne brzine vrtnje i slučaju gdje je $\tau_{Mec} \geq 10 \cdot t_F$. Ako je $\tau_{Mec} \leq 10 \cdot t_F$ onda ovisi o vlastitijoj frekvenciji ω_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{Mec} \cdot \tau_M} \cdot \left(1 - \frac{R_M \cdot I_{rM}}{U_{rM}} \right)} \quad (3.20)$$

pri čemu je:

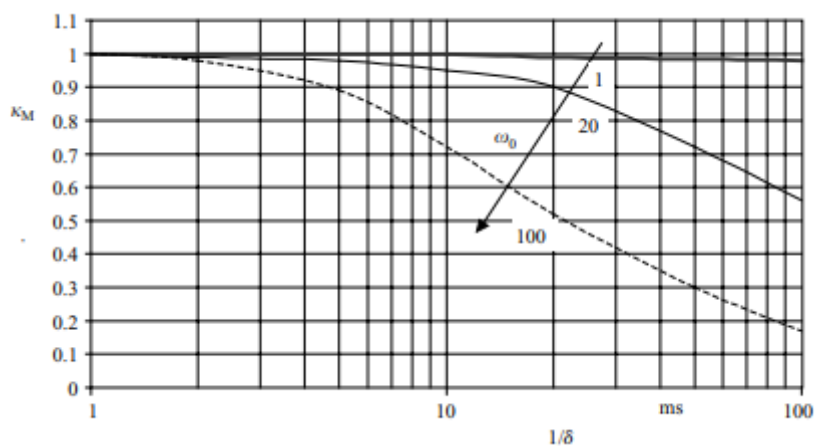
τ_{Mec} - mehanička vremenska konstanta

τ_M - vremenska konstanta armaturnog namota

Faktor prigušenja iznosi:

$$\frac{1}{\delta} = 2 \cdot \tau_M \quad (3.21)$$

Razuman raspon vrijednosti faktora κ_M prikazan je na slici 3.8.



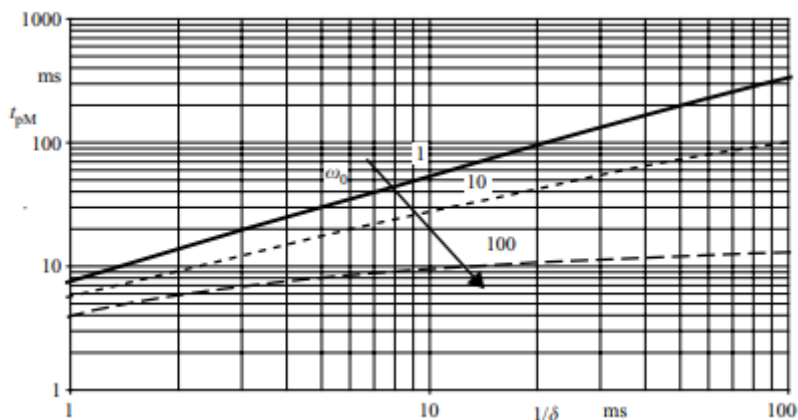
Slika 3.8. Faktor κ_M za izračun maksimalne struje kratkog spoja istosmjernog motora s nezavisnom uzбудom

Vrijeme do postizanja maksimuma struje KS t_{pM} , vremenska konstanta porasta τ_{1M} i vremenska konstanta opadanja τ_{2M} ovise o vrijednosti mehaničke konstante τ_{Mec} . U normi 61660-1 definiraju se 4 faktora k_{1M} , k_{2M} , k_{3M} i k_{4M} koja su prikazani na slikama 3.10-3.13.

Kada je brzina vrtnje motora konstantna ili u slučaju kada je $\tau_{Mec} \geq 10 \cdot t_F$ vrijeme maksimuma t_{pM} računa se prema sljedećem izrazu:

$$t_{pM} = k_{1M} \cdot \tau_M \quad (3.22)$$

Za sve druge slučajeve, tj. $\tau_{Mec} < 10 \cdot t_F$, uobičajen raspon vrijednosti prikazan je na slici 3.9.



Slika 3.9. Vrijeme maksimuma struje kratkog spoja za istosmjerne motore s nezavisnom uzбудom ($\tau_{Mec} < 10 \cdot t_F$)

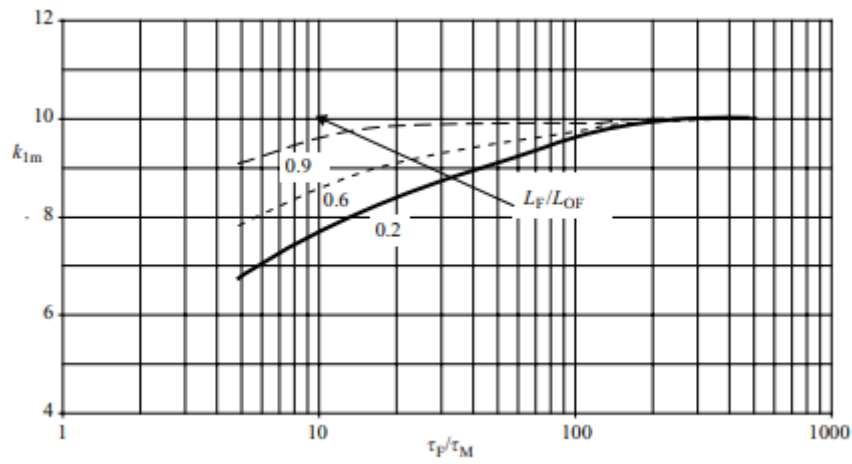
Vremenska konstanta porasta struje:

$$\tau_{1M} = k_{2M} \cdot \tau_M \quad (3.23)$$

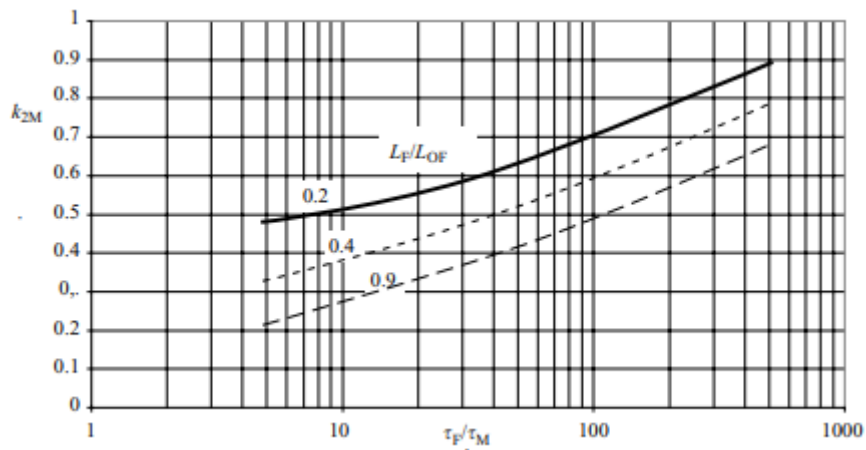
Vremenska konstanta opadanja:

$$\tau_{2M} = \tau_F \quad n = n_n = const. \quad (3.24)$$

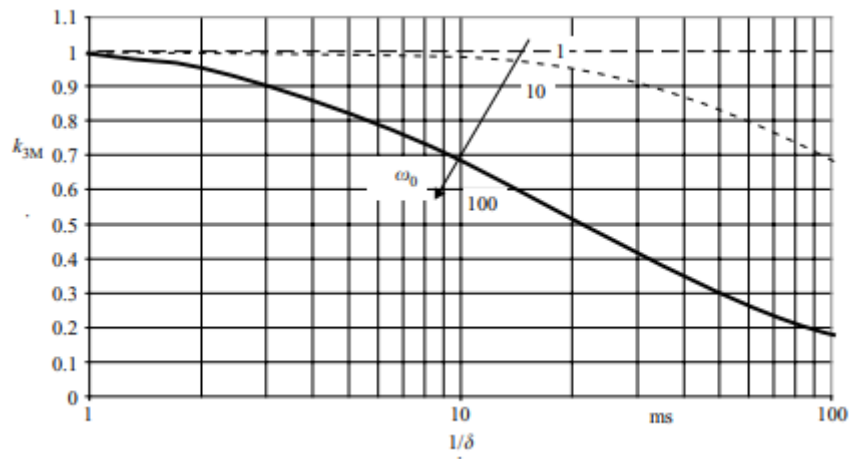
$$\tau_{2M} = k_{4M} \cdot \frac{L_{OF}}{L_F} \cdot \tau_{Mec} \quad n \rightarrow 0 \quad (3.25)$$



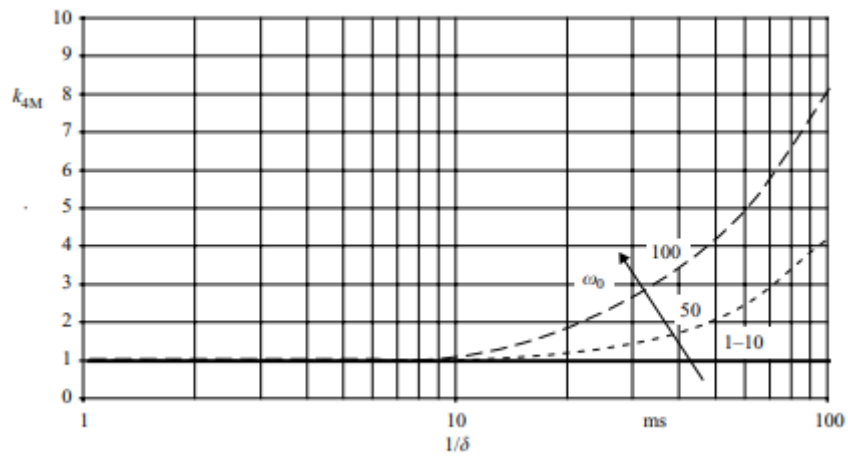
Slika 3.10. Faktor k_{1M} u slučaju istosmjernog motora s nezavisom uzбудom ($\tau_{Mec} \geq 10 \cdot t_F$)



Slika 3.11. Faktor k_{2M} u slučaju istosmjernog motora s nezavisom uzбудom ($\tau_{Mec} < 10 \cdot t_F$)



Slika 3.12. Faktor k_{3M} u slučaju istosmjernog motora s nezavisom uzбудom ($\tau_{Mec} < 10 \cdot t_F$)



Slika 3.13. Faktor k_{4M} u slučaju istosmjernog motora s nezavisom uzбудom ($\tau_{Mec} < 10 \cdot t_F$)

4 Ukupna struja kratkog spoja

Pri proračunu ukupne struje kratkog spoja u obzir se uzimaju zajedničke grane istosmjernje mreže. Zajednička grana je grana koja vodi struju kratkog spoja iz više izvora. Kada nemamo zajedničku granu u istosmjernjoj mreži ukupna suma struja kratkog spoja je proračunata superpozicijom parcijalnih struja kratkog spoja. Inače, parcijalne struje kratkog spoja iz različitih izvora moraju biti korigirane s faktorom σ_j , koji ovisi o otpornosti izvora i zajedničkih grana R_Y .

$$i_{pkorj} = \sigma_j \cdot i_{pj} \quad (4.1)$$

$$I_{kkorj} = \sigma_j \cdot i_{kj} \quad (4.2)$$

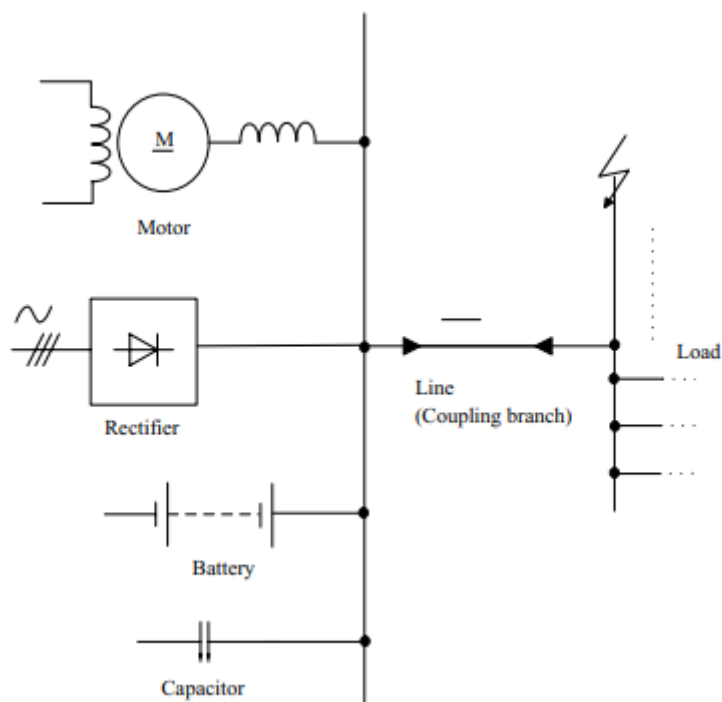
Faktor σ_j za svaki izvor j glasi:

$$\sigma_j = \frac{R_{resj} \cdot (R_{ij} + R_Y)}{R_{resj} \cdot R_{ij} + R_{ij} \cdot R_Y + R_{resj} \cdot R_Y} \quad (4.3)$$

Otpor zajedničke grane izvora je R_{ij} , a ekvivalentni otpor preostalih izvora koji doprinose struji kratkog spoja je R_{resj} . Otpor kondenzatora je zanemaren, a motori se uzimaju u obzir samo ako doprinose kvazi stacionarnoj struji kratkog spoja. Jednadžbe za proračun otpora R_{ij} i ekvivalentnog otpora R_{resj} prikazane su u tablici 5.1, pretpostavljeno je da sva 4 izvora pridonose struji kratkog spoja kroz jednu zajedničku granu kao što je i prikazano na slici 4.1.

Tablica 4.1. Otpor R_{ij} i ekvivalentni otpor R_{resj} za proračun korekcijskih faktora

Izvor j	Otpor R_{ij}	Ekvivalentni otpor R_{resj}
Kondenzator	$R_{iC} = R_C + R_{CL}$	$R_{resC} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}} + \frac{1}{R_{iM}}}$
Baterija	$R_{iB} = R_B + R_{BL}$	$R_{resB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iM}}}$
Ispravljač	$R_{iD} = \frac{U}{I_{kD}} - R_Y$	$R_{resD} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iB}} + \frac{1}{R_{iM}}}$
Istosmjerni motor s nezavisnom uzбудom	$R_{iM} = R_M + R_{ML}$	$R_{resM} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iD}} + \frac{1}{R_{iB}}}$



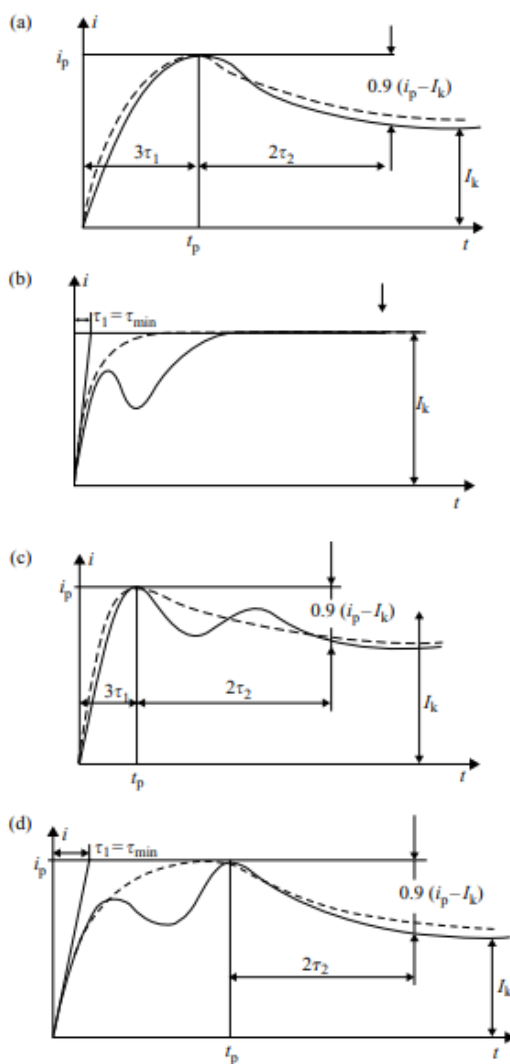
Slika 4.1. Ekvivalentna shema istosmjerne mreže

Vremenska konstanta porasta (τ_{1M}) i vremenska konstanta opadanja (τ_{2M}) parcijalne struje kratkog spoja se ne korigiraju. Ukupna struja kratkog spoja računa se metodom superpozicije korigiranih parcijalnih struja kratkog spoja iz različitih izvora.

$$i_1(t) = \sum_{j=1}^m i_{pkorj} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_{1j}}}}{1 - e^{-\frac{t_{pj}}{\tau_{1j}}}} \quad \text{za } 0 \leq t \leq t_{pj} \quad (4.4)$$

$$i_2(t) = \sum_{j=1}^m i_{pkorj} \left(\left(1 - \frac{I_{kkorj}}{i_{pkorj}} \right) \cdot e^{-\frac{-(t-t_{pj})}{\tau_{2j}}} + \frac{I_{kkorj}}{i_{pkorj}} \right) \quad \text{za } t_{pj} \leq t \leq T_k \quad (4.5)$$

Proračun toplinskih i elektromagnetskih utjecaja struje kratkog spoja prema normi IEC 61660-2 temeljen je na aproksimacijama. Grafovi koji prikazuju aproksimacije prikazani su na slici 4.2. Maksimalna struja kratkog spoja i_p , kvazi stacionarna struja kratkog spoja i_k i vremenska konstanta opadanja τ_2 određuju se grafički iz vremenske krivulje ukupne struje kratkog spoja.



Slika 4.2 Tipični oblici ukupne struje kratkog spoja

Vremenska konstanta porasta računa se prema grafu prikazanom na slici 4.2 pod (a) i (c)

$$\tau_1 = \frac{t_p}{3} \quad (4.6)$$

i prema prikazanom na slici 4.2 pod (b) i (d)

$$\tau_1 = \text{MIN}\{\tau_{1C}; \tau_{1B}; \tau_{1D}; \tau_{1M}\} \quad (4.7)$$

Vremenska konstanta porasta τ_{1C} za kondenzator se zanemaruje ako je:

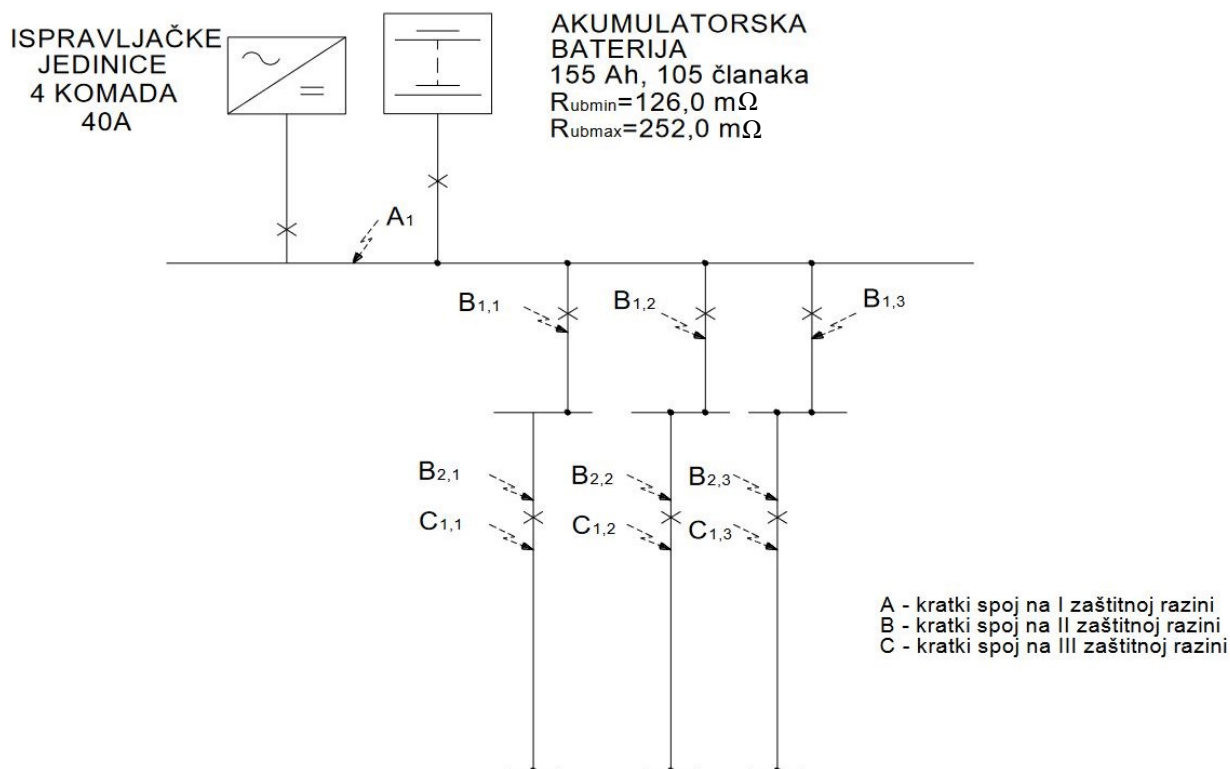
$$i_{pC} \leq 0.5 \cdot i_p \quad (4.8)$$

Vremenska konstanta opadanja τ_2 jednaka je polovici vremena trajanja struje kratkog spoja pri čemu je $i_2(t)$ umanjen za $0.9 \cdot (i_p - I_k)$, tj. struja kratkog spoja ima vrijednost $(I_k + 0.1 \cdot i_p)$.

5 Numerički primjer

5.1 Shema i tipovi prekidača

Na slici 5.1 nalazi se shema koja prikazuje dio podsustava istosmjernog razvoda napajanja prijenosne transformatorske stanice. Na slici se može primijetiti podjela na tri zaštitne razine, a na svakoj zaštitnoj razini nalaze se prekidači.



Slika 5.1. Shema s prikazanim karakterističnim točkama za proračun maksimalne struje kratkog spoja

Na svakoj zaštitnoj razini se nalaze zaštitni uređaji koji služe za isključivanje dijela mreže u slučaju kvara. Ako se dogodi kvar, kratki spoj, na trećoj razini, uz pomoć prekidača isklopit će se samo dio mreže u kojem se dogodio kratki spoj, a ostatak mreže će nastaviti normalno raditi. U tablici 6.1 prikazani su prekidači koji se nalaze na pojedinim zaštitnim razinama i struje trajnog opterećenja kojima su prekidači stalno opterećeni.

Tablica 5.1. Tipovi prekidača na zaštitnim razinama

Razina	Tip prekidača	Struja trajnog opterećenja (I_T)
I	NSX 250N/TM 200D	200 A
II	NSX 100F/TM 40D	40 A
III	C60H-DC-(6A)	6 A

5.2 Ulazni podaci za proračun

Unutarnji otpor nove i pune baterije (prema podacima proizvođača baterije) pri temperaturi okoline 20°C iznosi:

$$R_{ubmin} = 0,95 \text{ m}\Omega \quad (5.1)$$

Ovaj otpor mjerodavan je za proračun maksimalne struje kratkog spoja.

Pretpostavlja se da je unutarnji otpor stare i prazne baterije pri temperaturi okoline 5°C dvostruko veći i iznosi:

$$R_{ubmax} = 1,9 \text{ m}\Omega \quad (5.2)$$

Ovaj otpor je mjerodavan za proračun minimalne struje kratkog spoja.

Otpori pojedinih dionica vodiča izračunati su prema formuli:

$$R_x = \rho \frac{2l}{S} \quad (5.3)$$

pri čemu je:

R_x - otpor odgovarajuće dionice vodiča

l - dužina vodiča

ρ - specifični otpor bakra koji iznosi $0,0175 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$ na 20°C

S - presjek vodiča

2 - faktor povrata vodiča od sabirnica

U tablici 6.2 navedeni su ulazni podaci DC mreže koji su potrebni za proračun struje kratkog spoja za korištenu shemu prikazanoj na slici 5.1.

Tablica 5.2. Ulazni podaci za proračun struje kratkog spoja

U_n	220 V
n	105
U_{max}	238,4 V
U_{min}	194,25 V
R_{ubmin}	0,95 m Ω
R_{ubmax}	1,9 m Ω
R_v	5 m Ω
ρ	0,0175 $\frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$
I	40 A
k	1.1

Formule potrebne za proračun struja kratkog spoja navedene su u jednadžbama 5.4 i 5.5.

$$I_{ksmax} = \frac{U_{max} + k_i + I_i(1.1 \cdot R_{ub} + R_V)}{1.1 \cdot R_{ubmin} + R_V + R_x} \quad (5.4)$$

$$I_{ksmin} = \frac{U_{min}}{1.1 \cdot R_{ubmax} + R_V + R_x} \quad (5.5)$$

pri čemu je:

I_{ksmax} - maksimalan struja kratkog spoja

I_{ksmin} - minimalna struja kratkog spoja

U_{max} - maksimalni napon na akumulatorskoj bateriji

U_{min} - minimalni dopušteni napon na akumulatorskoj bateriji ($0.9 \cdot U_n$)

k_i - koeficijent ograničenja struje ispravljača, iznosi 1,1

I_i - nazivna struja ispravljača

1.1 - faktor povećanja R_{ub} za 10% zbog spojeva između članaka

R_{ub} - unutarnji otpor akumulatorske baterije

R_V - otpor vodova između akumulatorske baterije i sabirnicama uključivo i otpor zaštitnih prekidača i sabirnica

R_x - otpor vodova do mjesta kratkog spoja

5.3 Rezultati proračuna

Tablica 5.3. Vrijednosti maksimalne i minimalne struje kratkog spoja

Zaštitna razina	Kabel	Duljina [m]	Površina [mm ²]	Otpor kabela [mΩ]	Maksimalna struja kratkog spoja [A]	Minimalna struja kratkog spoja [A]
I	Baterija-BZ	10	70	5	1880,17	688,34
I	Ispravljačka jedinica-BZ	25	70	12,5	1753,76	670,52
II	Najduži kabel	25	6	145,8	911,1	453,86
II	Najkraći kabel	4	6	23,3	1579,83	635,84
III	Najduži kabel	120	2.5	1680	144,59	99.00
III	Najkraći kabel	50	2.5	700	312,56	197,77

U tablici 6.3 navedena su rješenja za maksimalnu i minimalnu struju kratkog spoja. Izrazi su dobiveni prema formulama 5.4 i 5.5, a otpor kabela prema formuli 5.3. Na prvoj zaštitnoj razini proračunate su maksimalne i minimalne struje kratkog spoja za oba prekidača koja su tipa NSX 250N/TM 200D. Prema podacima proizvođača Schneider electric prekidači su sposobni prekinuti dobivene struje kratkog spoja. Na drugoj i trećoj zaštitnoj razini proračunata su samo dva slučaja, slučaj kada dobivamo najveću i najmanju struju kratkog spoja na bilo kojem mjestu mreže. Na drugoj zaštitnoj razini postavljeni su prekidači tipa NSX 100F/TM 40D koji su sposobni zaštititi mrežu, te prekinuti proračunom dobivene struje. Na trećoj zaštitnoj razini postavljeni su prekidači tipa C60H-DC-(6A) koji su poznatiji pod imenom automatski osigurači.

6 Zaključak

U teorijskom dijelu rada obrađen je kratki spoj u istosmjernim strujnim krugovima, te je svaki element koji doprinosi struji kratkog spoja u istosmjernim mrežama zasebno objašnjen. Elementi koji doprinose struji kratkog spoja u istosmjernim mrežama su: kondenzatori, baterije, ispravljači i istosmjerni motori s nezavisnom uzbudom.

U numeričkom primjeru dobiveni su rezultati za primjer istosmjerne mreže. Istosmjerna mreža ima preko 40 kabela pomoću kojih su povezani svi potrošači, ali unutar ovoga rada dobivene su maksimalne i minimalne struje kratkog spoja na svim zaštitnom razinama. Na primjer, na drugoj razini su postavljeni prekidači tipa NSX 100F/TM 40D i ako prekidač može prekinuti maksimalnu i minimalnu struju na drugoj zaštitnoj razini, onda je sposoban prekinuti i preostale struje kratkog spoja koje se nalaze između dvije dobivene vrijednosti u ovome radu.

Vrlo je važno postaviti zaštitne uređaje na svim naponskim razinama kako izmjeničnih mreža tako i istosmjernih mreža budući da u svim mrežama postoji odgovarajuća vjerojatnost nastanka kvara ponekad s vrlo značajnim posljedicama poput požara ili ozbiljnih ozljeda osoba koje se nalaze u dodiru s kvarnim dijelom mreže. Unutar ovoga rada napisan je pregled kratkog spoja kod istosmjernih mreža, iako su istosmjerne mreže puno rjeđe od izmjeničnih, ali i u njima može doći do ozbiljnih kvarova.

Popis slika

Slika 2.1. Ekvivalentni dijagram elemenata u istosmjernim mrežama i tipični tijek struje kratkog spoja (a - kondenzator, b - baterija, c - ispravljač u trofaznom mosnom spoju, d - istosmjerni motor s nezavisnom uzбудom)	8
Slika 2.2. Standardna aproksimacija funkcije struje kratkog spoja.....	9
Slika 3.1. Faktor κC za izračun maksimalne struje kratkog spoja kondenzatora.....	11
Slika 3.2. Vrijeme porasta tpC za izračun struja kratkog spoja kondenzatora	12
Slika 3.3. Faktor $k1C$ za izračun konstante faktora porasta.....	12
Slika 3.4. Faktor $k2C$ za izračun konstante faktora opadanja.....	13
Slika 3.5. Vremenska konstanta porasta $\tau1B$ i vrijeme maksimuma tpB pri struji kratkog spoja baterije.....	15
Slika 3.6. Faktor λD za izračun kvazi stacionarne struje kratkog spoja ispravljača	16
Slika 3.7. Faktor κD za izračun maksimalne struje kratkog spoja ispravljača.....	16
Slika 3.8. Faktor κM za izračun maksimalne struje kratkog spoja istosmjernog motora s nezavisnom uzбудom.....	19
Slika 3.9. Vrijeme maksimuma struje kratkog spoja za istosmjerne motore s nezavisnom uzбудom ($\tau Mec < 10 \cdot tF$)	19
Slika 3.10. Faktor $k1M$ u slučaju istosmjernog motora s nezavisnom uzбудom ($\tau Mec \geq 10 \cdot tF$)	20
Slika 3.11. Faktor $k2M$ u slučaju istosmjernog motora s nezavisnom uzбудom ($\tau Mec < 10 \cdot tF$)	20
Slika 3.12. Faktor $k3M$ u slučaju istosmjernog motora s nezavisnom uzбудom ($\tau Mec < 10 \cdot tF$)	21
Slika 3.13. Faktor $k4M$ u slučaju istosmjernog motora s nezavisnom uzбудom ($\tau Mec < 10 \cdot tF$)	21
Slika 4.1. Ekvivalentna shema istosmjerne mreže	23
Slika 4.2 Tipični oblici ukupne struje kratkog spoja.....	24
Slika 5.1. Shema s prikazanim karakterističnim točkama za proračun maksimalne struje kratkog spoja	26

Popis tablica

Tablica 4.1. Otpor Rij i ekvivalentni otpor $Rresj$ za proračun korekcijskih faktora	231
Tablica 5.1. Tipovi prekidača na zaštitnim razinama.....	275
Tablica 5.2. Ulazni podaci za proračun kratkog spoja	297
Tablica 5.3. Vrijednosti maksimalne i minimalne struje kratkog spoja.....	Error! Bookmark not defined. 9

Sažetak

U ovom radu razmatrali smo proračun struje kratkog spoja u istosmjernim mrežama. Prvo su definirani svi elementi koji doprinose struji kratkog spoja u istosmjernim mrežama, a svaki element je kasnije detaljno razrađen kroz zasebna potpoglavlja. Kod struje kratkog spoja važno je da imamo postavljene prekidače koji su sposobni prekinuti maksimalne struje kratkog spoja, ali i u isti tren da su dovoljno „osjetljivi“ za prekidanje minimalne struje kratkog spoja.

Ključne riječi: kratki spoj, istosmjerne mreže, struja kratkog spoja

Abstract

In this paper we considered short-circuit calculation in direct current installations. First we defined elements which contribute to short-circuit current in direct current installations, and each element is later explained through separate subchapters. In the case of short-circuit current it's important to have circuit breakers installed that are capable of interrupting maximum short-circuit current, but in same time „sensitive“ enough to interrupt minimum short-circuit current.

Key words: short-circuit, DC instalations, short-circuit current

Literatura

1. Schalabbach, J.; Short-circuit Currents, IET, 2005.
2. Norma IEC 61660-1
3. Norma IEC 61660-2
4. Norma IEC 61660-3