

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**IZBOR PREKIDAČA I RASTAVLJAČA U ZAMKASTOJ MREŽI**

Rijeka, rujan 2015.

Antonio Fabijanić

0069051261

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**IZBOR PREKIDAČA I RASTAVLJAČA U ZAMKASTOJ MREŽI**

Mentor: mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.

Rijeka, rujan 2015.

Antonio Fabijanić

0069051261

**TEHNIČKI FAKULET**

Povjerenstvo za završne ispite  
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike  
Br.: 602-04/15-14/24  
Rijeka, 06.03.2015.

**Z A D A T A K**  
za završni rad

Pristupnik: Antonio Fabijanić

Matični broj: 0069051261  
Lokalni matični broj: 11800014

Naziv zadatka: **IZBOR PREKIDAČA I RASTAVLJAČA U ZAMKASTOJ MREŽI**

Naziv zadatka na  
engleskom jeziku: **SWITCHGEAR SELECTION IN HV NETWORKS**

Sadržaj zadatka:

Osnovno o sklopnim aparatima VN. Struje kratkog spoja: prekidna struja, udarna struja i struja mjerodavna za ugrijavanje. Prekidna snaga. Objasniti kriterije izbora prekidača i rastavljača. Napraviti izbor prekidača i rastavljača za jednu zamkastu mrežu.

Zadano: 17.03.2015.

Mentor:



V. pred. mr. sc. Marijana Živić-Đurović

Predsjednica Povjerenstva:



Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Zadatak preuzeo dana: 17.03.2015.



(potpis pristupnika)

Dostaviti:

- Predsjednica Povjerenstva
- Mentor
- Djelovođa Povjerenstva
- Evidencija studija
- Pristupnik
- Arhiva Zavoda

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

### IZJAVA

Sukladno članku 9. *Pravliniku o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija*, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku broj 602-04/15-14/24 od 06. ožujka 2015.

Rijeka, rujan 2015.

---

Antonio Fabijanić

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	2
2. RASKLOPNA POSTRIJENJA.....	3
2.1.Osnovno o rasklopnim postrojenjima.....	3
2.2.Naprezanja u rasklopnim postrojenjima.....	4
3. PREKIDAČI.....	6
3.1.Uloga prekidača.....	6
3.2.Zračni prekidači.....	7
3.3.Pneumatski prekidači.....	8
3.4.Uljni prekidači.....	8
3.5.Malouljni prekidači.....	9
3.6.Hidromatski prekidači.....	10
3.7.SF6 prekidači.....	10
3.8.Vakuumski prekidači.....	11
3.9.Izbor prekidača.....	11
4. RASTAVLJAČI.....	13
4.1.Uloga rastavljača.....	13
4.2.Izbor rastavljača.....	16
5. KRATKI SPOJ.....	18
5.1.Općenito o kratkom spoju.....	18
5.2.Vrste kratkog spoja.....	19
5.3.Udarna struja kratkog spoja.....	20
5.4.Prekidna struja kratkog spoja.....	23
5.5. Rasklopna snaga kratkog spoja u odnosu na mjesto nastanka kratkog spoja.....	23
5.6.Propisi za određivanje rasklopne snage.....	30
5.7. Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja.....	32
6. PRIMJER PREKIDAČA I RASTAVLJAČA U ZAMKASTOJ MREŽI.....	35
7. ZAKLJUČAK.....	47
8. LITERATURA.....	48

# 1. UVOD

Glavni cilj ovoga rada je upoznavanje sa prekidačima i rastavljačima, prilikama koje nastaju za vrijeme kratkog spoja te odabirom pravilnih prekidača i rastavljača kao bi se spriječilo oštećenje uređaja u mreži, kao i vodova.

Sam rad podijeljen je na 5 dijelova.

U prvom dijelu bit će govora o rasklopnom postrojenju (čemu služi, od kojih dijelova se sastoji, koja su naprezanja u rasklopnim postrojenjima) i sklopnim aparatima.

Druga i treća cijelina, govori o prekidačima i rastavljačima. Poblizje se upoznaje sa principom rada prekidača i rastavljača. Prekidači i rastavljači su obavezni dijelovi svakog rasklopnog postrojenja. Prilikom kvara u mreži, rastavljači i prekidači moraju osigurati da ne dođe do daljnjeg oštećenja uređaja u mreži te vodova. Upoznati će se sa vrstama prekidača te kriterijima za njihov izbor.

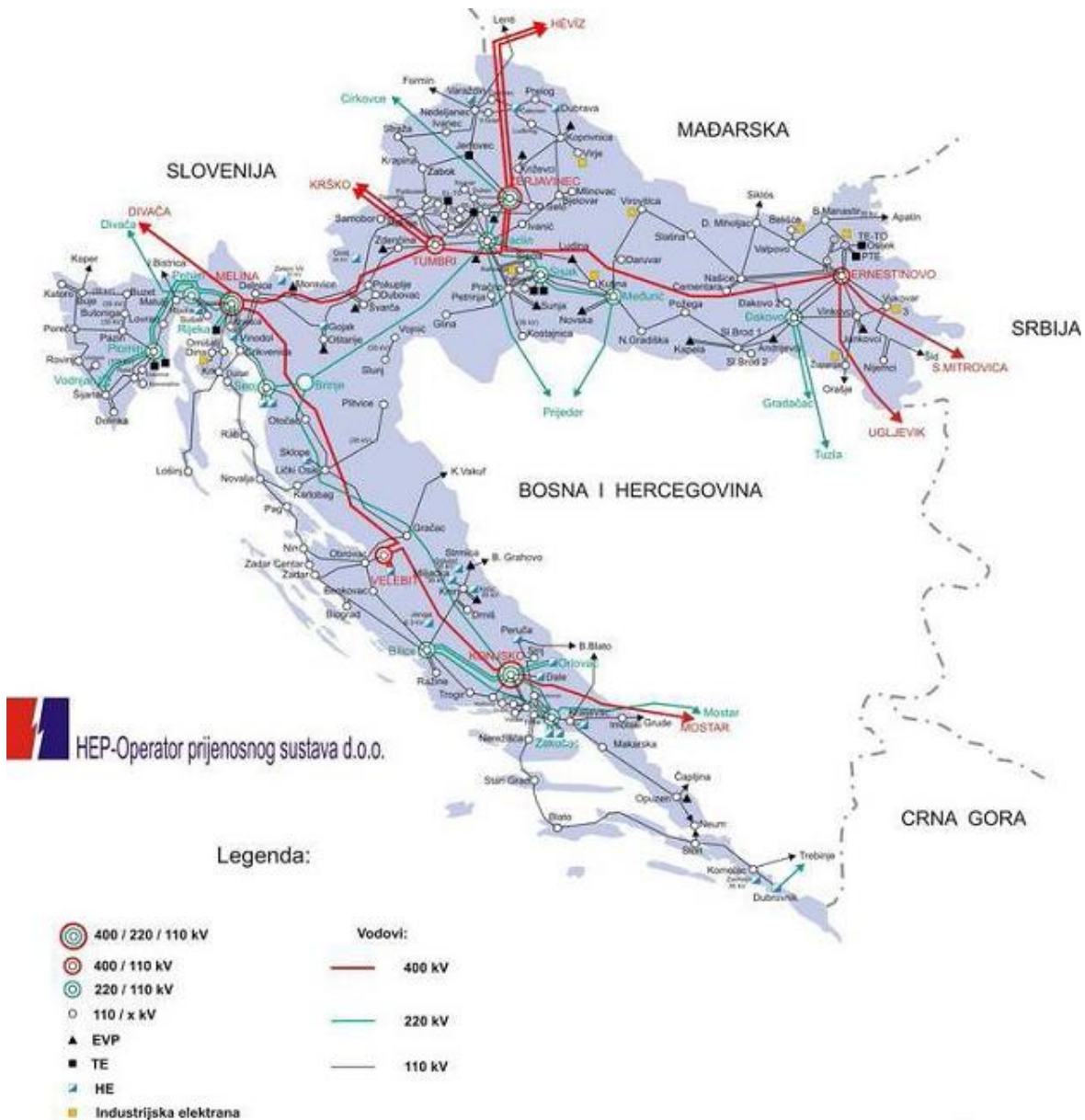
Četvrta cijelina prikazuje glavne značajke kratkog spoja, te struje koje se javljaju za vrijeme kratkog spoja.

U petom dijelu se nalazi primjer zamkaste mreže u kojoj je potrebno izračunati udarnu struju kratkog spoja i struju mjerodavnu za ugrijavanje te na temelju tih vrijednosti odabrati prekidače i rastavljače.

## 2. RASKLOPNA POSTROJENJA

### 2.1. Osnovno o rasklopnim postrojenjima

Zbog velikog porasta potrošnje električne energije, potrebno je graditi velike elektrane i velike prijenosne mreže visokog napona. Kako bi opskrba kupaca električnom energijom i razmijena električne energije bila što sigurnija i kvalitetnija, hrvatski elektroenergetski sustav povezan je sa susjednim državama. Na slici 2.1. prikazan je elektroenergetski sustav Republike Hrvatske [literatura: Hrvoje Požar – Visokonaponska rasklopna postrojenja].



Slika 2.1. Mreža i rasklopna postrojenja na području Republike Hrvatske

Općenito elektroenergetski sustav čine postrojenja za proizvodnju električne energije, prijenosna i distribucijska mreža te potrošači. Budući da se radi o velikom naponu kao i o velikoj struji, razvod i transformaciju električne enrgije nije moguće ostvariti bez rasklopnih postrojenja. Rasklopna postrojenja se sastoje od sklopnih aparata (uređaja za uklapanje i isklapanje), transformatora, uređaja za zaštitu transformatora i vodova, uređaja za mjerenje, uređaja za upravljanje uklopnim aparatima i uređaja za signalizaciju stanja pojedinih uređaja. Rasklopno postrojenje se nalazi u svakom čvoru mreže.

Prema smještaju rasklopna postrojenja mogu biti unutarnje i vanjske izvedbe. Uređaji u unutarnjim postrojenjima su jednostavnije konstrukcije jer su zaštićeni od vanjskih utjecaja kao što su prašina, vlaga, sunce, kiše... Unutarnja postrojenja su smještena u zgradama koje zahtijevaju posebnu izvedbu zbog čega su ovakve izvedbe i skuplje. Zbog toga se prelazi na vanjsku izvedbu, gdje elementi postrojenja moraju biti konstruirani tako da mogu funkcionirati pri utjecaju vanjskih prilika.

## **2.2. Naprezanja u rasklopnim postrojenjima**

U rasklopnom postrojenju aktivni dijelovi i vodiči moraju biti takve izvedbe da ne dođe do oštećenja prilikom djelovanja napona, kao ni zbog mogućnosti pojave velikih struja u vodičima. Svi uređaji moraju biti tako konstruirani da mogu izdržati djelovanje napona i struje.

Kad govorimo o naponu, razlikujemo nazivni i najviši napon mreže. Nazivni napon je ona vrijednost napon po kojem je mreža dobila ime, dok je najviši napon mreže onaj napon koji se u normalnim uvjetima pojavljuje u mreži i koji definira razinu izolacije. Ovi naponi su definirani standardima u pojedinim zemljama.

U mrežama se pojavljuju i veći naponi koji se javljaju prilikom isklapanja, zbog prijelaznih pojava i atmosferskog pražnjenja. Tada govorimo o ispitnom naponu (napon kojeg ispitivani uređaj mora izdržati), podnosivom naponu (napon kojeg uređaj, uz standardne atmosferske prilike, mora izdržati jednu minutu pri čemu ne smije doći do proboja) te udarnom naponu.

Kod struje razlikujemo nazivnu struju i struje koje se javljaju za vrijeme kratkog spoja. Ona struja koja može neograničeno dugo teći kroz vodič ili uređaj, a da pritom ne dođe do oštećenja zove se



nazivna struja. Struje koje se javljaju kod kratkog spoja su udarna i rasklopna struja kratkog spoja te struja mjerodavna za ugrijavanje.

Sklopni aparati su aparati koji služe za prekidanje i održavanje normalnih i nenormalnih stanja mreže naglom promjenom vlastitog otpora. Sklopni aparati također omogućavaju uklapanje i isklapanje, regulaciju i pokretanje te zaštitu i upravljanje uređaja koji služe za proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije. Danas se uglavno koriste mehanički sklopni aparati čiji se kontakti spajaju i razdvajaju u trenutku sklapanja. Također postoje i beskontaktni sklopni aparati koji sklapaju struju upravljanjem vodljivošću poluvodiča. Sklopne aparate možemo podijeliti prema nazivnom naponu i prema namjeni. Podjela prema nazivnom naponu je:

*Tablica 2.1. Podjela sklopnih aparata prema nazivnom naponu*

niskonaponski aparati	$U \leq 1 \text{ kV}$ ; izmjenični napon $U \leq 1,2 \text{ kV}$ ; istosmjerni napon
srednjenaponski aparati	$3,6 \text{ kV} \leq U \leq 52 \text{ kV}$
visokonaponski aparati	$72,5 \text{ kV} \leq U \leq 420 \text{ kV}$
vrlo visoki napon	$525 \text{ kV} \leq U$

Sklopni aparati koji se koriste u visokonaponskoj mreži su: prekidači, sklopke, visokonaponski osigurači, rastavljači, rastavne sklopke, zemljospojnici i odvodnici prenapona.

### 3. PREKIDAČI

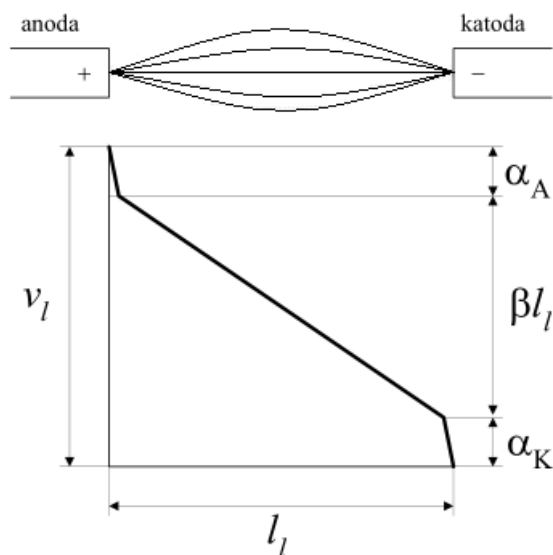
#### 3.1. Uloga prekidača

Prekidači služe za otvaranje i zatvaranje strujnih krugova kao i za zaštitu od struja kratkog spoja. Vode i prekidaju nazivnu struju, tj. struju u normalnim pogonskim uvjetima, te u određenom vremenu mogu voditi i prekidati struju kvara, kao što je struja kratkog spoja. Djelimo ih na prekidače za visoki napon i niski napon. Kod prekidača za visoki napon javlja se električni luk.

Električni luk se javlja mehaničkim razdvajanjem kontakata, odnosno prilikom uklapanja i isklapanja sklopnog uređaja. Prilikom razdvajanja dolazi do zagrijavanja kontakata, zbog čega dolazi do njihova taljenja i isparavanja, što znači da je prostor između kontakata vodljiv, pa struja i dalje teče, iako su kontakti razdvojeni. Pad napona u luku se može podijeliti na dva djela: neposredno uz kontakte i prostor među kontaktima, kao što je prikazano na slici 3.1 [literatura: Hrvoje požar – Visokonaponska rasklopna postrojenja]. Pad napona u luku može se opisati relacijom (3.1)

$$V_l \cong \alpha + \beta l_l \quad (3.1)$$

gdje je  $l_l$  razmak među kontaktima, a  $\alpha = \alpha_A + \alpha_K$ .



Slika 3.1. Pad napona uzduž luka

Energija luka se određuje relacijom (3.2)

$$W_l = \int_0^{t_l} v_l i_l dt \quad (3.2)$$

te odvođenjem te topline gasi se luk, jer vodljivost medija ovisi prvenstveno o temperaturi.

Kako bi se električni luk ugasio potrebno je: vrlo brzo stvoriti dovoljan razmak između kontakata kako bi se postigla udaljenost na kojoj će se električni luk ugasiti i na kojoj neće doći do ponovnog paljenja; smanjiti presjek luka da bi se povećao pad napona; te osigurati odvođenje topline.

U izmjeničnim strujnim krugovima, pojava električnog luka sprječava nagli prekid struje što ujedno znači da sprječava i pojavu velikih prenapona u mreži. Kada struja poprimi vrijednost nula, dolazi do gašenja električnog luka, te se mora poduzeti sve kako se električni luk nebi ponovno upalio, što se postiže tako da se električna čvrstoća prostora između kontakata povećá. Ukoliko se to ne postigne, dolazi do ponovnog paljenja luka, te traje sve dokle struja ponovno ne prođe kroz vrijednost nula. Kod pojave električnog luka razvija se veoma velika toplinska energija koja uzrokuje nagaranje ili izgaranje kontakata, oštećenje izolacije i eksplozije prekidača.

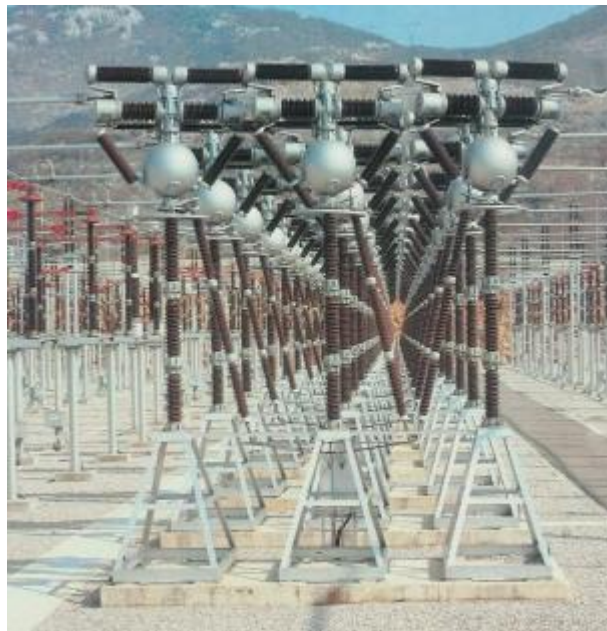
Za gašenje električnog luka u istosmjernim strujnim krugovima nužno je povećati otpor luka, to jest povećati pad napona električnog luka tako da bude veći od napona mreže. Prema sredstvu za gašenje električnog luka, prekidače djelimo na uljne, vakuumske, malouljne, pneumatske, hidromatske, SF<sub>6</sub>, zračne i prekidače sa magnetskim puhanjem. Kod visokog napona danas se najviše koristi prekidači sa SF<sub>6</sub> (sumporov heksafluorid).

### **3.2. Zračni prekidači**

Kod zračnih prekidača, električni luk se gasi tako da se kontakti razdvajaju u zraku na takvu duljinu koja je potrebna da se električni luk prekine. Prednosti zračnih prekidača su dobra izolacijska svojstva, laka dostupnost te cijena. Nedostaci su mala dielektrična čvrstoća i mala toplinska vodljivost zbog čega se sporo deionizira prostor između kontakata. Gašenje luka se postiže povećanjem duljine luka i smanjenjem presjeka luka, hlađenjem luka i razbijanjem luka na više manjih ili većih dijelova. Koristi se na naponima između 6 kV i 35 kV.

### 3.3. Pneumatski prekidači

Pneumatski prekidači koriste komprimirani zrak kao medij kojim gase električni luk. Komprimirani zrak struji uzdužno ili poprečno na luk i usput hladi električni luk, ali ujedno dovodi i svjež zrak koji sprječava da se električni luk ponovno upali. Komprimirani zrak u odnosu na atmosferski zrak, ima bolja dielektrična i toplinska svojstva. Obično se izvode kao dvotlačni, što znači da zrak struji iz komore sa višim tlakom u komoru sa nižim atmosferskim tlakom. Na slici 3.2. prikazan je pneumatski prekidač za napon 400kV [literatura: prof. dr. sc. Ante Marušić - Sklopni i zaštitni uređaji].



*Slika 3.2. Pneumatski prekidači 400kV*

### 3.4. Uljni prekidači

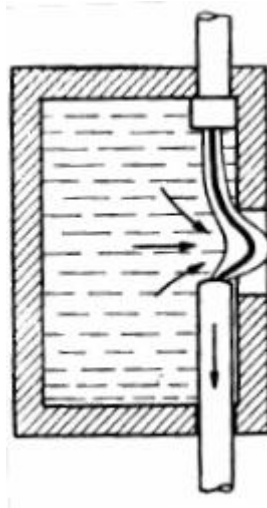
Uljni prekidači (slika 3.3.) su najstariji oblik visokonaponskih prekidača. Kod ovih prekidača ulje se koristi i kao izolator i kao sredstvo sa gašenjem električnog luka. Uljne pare imaju dobra dielektrična i toplinska svojstva jer sadrže visoku koncentraciju vodika kojemu se dielektrična svojstva povećavaju sa porastom tlaka u kotlu. Mane uljnih prekidača su: nastajanje uljnih para zbog čega može doći do eksplozija, potrebna je velika količina ulja (pogotovo na visokom naponu) te nastajanje čađe u ulju koju je potrebno čistiti.



*Slika 3.3. Uljni prekidač 66 kV*

### **3.5. Malouljni prekidači**

Kod ove vrste prekidača, ulje služi samo kao sredstvo za gašenje luka kako bi se izbjegle moguće eksplozije, zbog čega se, za razliku od uljnih prekidača, koristi mala količina ulja.



*Slika 3.4. Princip rada malouljnog prekidača*

Nakon što se kontakti otvore, nastaje električni luk koji gori u zatvorenoj komori, zbog čega ulje isparava pa raste tlak u komori, koji će dovesti do naglog strujanja kroz otvor čim ga pomični kontakt oslobodi. Postoje dvije vrste malouljnih prekidača: malouljni prekidač sa uzdužnim strujanjem plina te prekidač sa poprečnim strujanjem plina.

### 3.6. Hidromatski prekidači

To su u principu malouljni prekidači kod kojih je ulje zamjenjeno nezapaljivom tekućinom. Koriste se za napone do 72 kV. Sredstvo za gašenje luka je destilirana voda u koju se dodaje glikol (sredstvo koje sprečava zaleđivanje vode). Ovi prekidači moraju imati poseban rastavni nož koji je u seriji s lučnom komorom jer se voda ne može upotrijebiti kao izolator. Zbog loših izolacijskih svojstava ova se tehnika sve manje koristi.

### 3.7. SF6 prekidači

Zbog velike gustoće plina SF6, ovi prekidači imaju veliku dielektričnu čvrstoću i dobru toplinsku vodljivost. Prekidači SF6 imaju i veliku elektronegativnost, što ujedno znači da pokazuju jako veliku sklonost prema elektronima, zbog čega se sa smanjenjem temperature atomi fluora vežu uz slobodne elektrone, te tako nastaje teško pokretljivi ioni, a vodljivost plazme se smanjuje. Daljnjim padom temperature, atomi fluora se vežu sa sumporom te tako nastaju molekule plina SF6. Nestajanjem luka nastaje dielektrik, odnosno vodljivost u prostoru između kontakata postaje jako mala. Plin je neotrovan, bez mirisa i boje, nezapaljiv, neagresivan te kemijski stabilan, ali je jako skup pa se ne ispušta u okolinu. Izvode se kao jednokomorni i dvokomorni. Na slici 3.5. prikazani su dvokomorni prekidač 400 kV i jednokomorni 245 kV [literatura: prof. dr. sc. Ante Marušić - Sklopni i zaštitni uređaji].

a)



b)



Slika 3.5. a) dvokomorni prekidač 400 kV; b) jednokomorni prekidač 245 kV

### 3.8. Vakuumski prekidači

Vakuum je svako sredstvo kojemu je tlak ispod normalnog atmosferskog tlaka. Vakuumski prekidači imaju velika mehanička svojstva i električnu trajnost, veliku pouzdanost, lako se održavaju, mogućnost eksplozije je jako mala, nezapaljivi su, imaju male dimenzije, struja se prekida prvim prolaskom kroz vrijednost nulu pri čemu se električni luk više ne pali. Jedini nedostaci su visoka cijena održavanja i visoki prenaponi.

### 3.9. Izbor prekidača

Izbor prekidača vrši se prema nazivnom naponu, nazivnoj struji te nazivnoj prekidnoj moći. Nazivna struja mora biti veća od maksimalne moguće struje kroz prekidač u normalnom pogonu.

$$I_n \geq \frac{S_{max}}{\sqrt{3}U_n} \quad (3.3)$$

Prekidna moć prekidača određena je kao zbroj prekidnih moći triju polova. Kako su polovi međusobno jednaki, prekidna moć prekidača jednaka je

$$S = \sqrt{3}U_p I_r \quad (3.4)$$

gdje su  $U_p$  linijski napon mreže na mjestu ugradnje prekidača, a  $I_r$  efektivna vrijednost struje u trenutku otvaranja kontakata. Efektivna vrijednost struje iznosi

$$I_r = \sqrt{I_s^2 + I_a^2} \quad (3.5)$$

Nazivne prekidne moći normirane su na sljedeći način (IEC za visokonaponske prekidače).

Tablica 3.1. Nazivne prekidne moći za prekidače (prema IEC-u)

Nazivni napon kV	Nazivna prekidna snaga MVA	Nazivna struja A								
10	150	400	-	-	-	-	-	-	-	-
	250	-	630	-	-	-	-	-	-	-
	350	-	630	-	1250	1600	-	-	-	-
	500	-	630	-	1250	1600	-	-	-	-
	750	-	-	-	1250	1600	-	2500	4000	-
	1000	-	-	-	1250	-	-	2500	4000	6300
20	250	400	630	-	-	-	-	-	-	-
	350	-	630	-	-	-	-	-	-	-
	500	-	630	-	1250	-	-	-	-	-
	1000	-	-	-	1250	-	-	-	-	-
30	500	-	630	-	-	-	-	-	-	-
	750	-	-	-	1250	-	-	-	-	-
	1000	-	-	-	1250	-	-	2500	-	-
	1500	-	-	-	1250	-	-	2500	-	-
60	1000	-	630	-	-	-	-	-	-	-
	1500	-	630	-	1250	-	-	-	-	-
110	2500	-	-	800	-	-	-	-	-	-
	3500	-	-	-	1250	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	1600	-	-	-	-
	7500	-	-	-	-	1600	-	-	-	-
150	3500	-	-	800	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	1250	-	-	-	-	-
220	5000	-	-	800	-	-	-	-	-	-
	7500	-	-	-	-	1600	-	-	-	-
	10000	-	-	-	-	1600	-	-	-	-
380	15000	-	-	-	-	-	2000	-	-	-

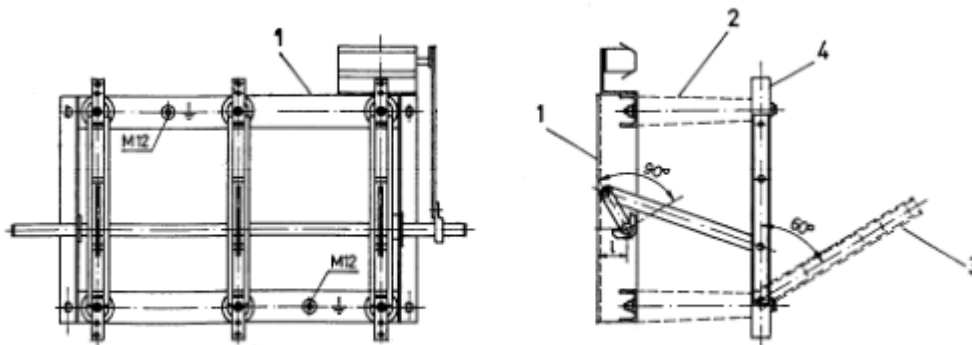


## 4. RASTAVLJAČI

### 4.1. Uloga rastavljača

Rastavljači su sklopni aparat koji služe da vidljivo odvoje dio rasklopnog postrojenja koji je pod naponom, od dijela rasklopnog postrojenja koji nije pod naponom. Dakle, njihov glavni cilj je da se poveća sigurnost postrojenja i sigurnost osoblja, zbog čega razmak između kontakata rastavljača mora biti vidljiv. Uklapanje i isklapanje rastavljača vrši se prvenstveno onda kada njima ne prolazi struja. Rastavljači trajno vode nazivnu struju, a određeno vrijeme i struju kratkog spoja.

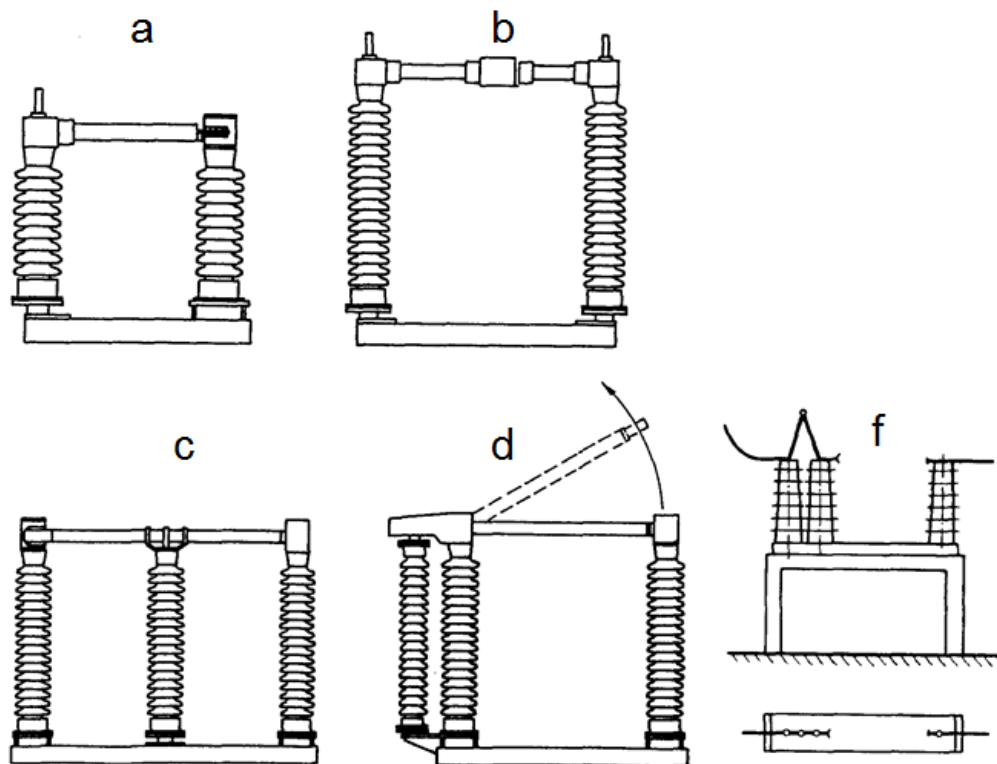
Srednjenaponski rastavljači (za nazivne struje do 2500 A) izvode se sa zajedničkim metalnim postoljem i pogonom kao jednopolni, dvopolni ili trolepolni, sa noževima za uzemljenje ili bez njih.



Slika 4.1. Izvedba rastavljača za napon 35 kV

- 1 – metalno postolje sa tri mehanička pola koji su međusobno povezani i istovremeno upravljivi
- 2 – epoksidni potporni izolatori
- 3 – kontaktni noževi
- 4 – noževi za uzemljenje

Kod viših napona postoji više konstrukcija koje omogućuju raznovrsne izvedbe rastavljača. Glavni cilj kod konstrukcije rastavljača je da ima malu tlocrtnu površinu u otvorenom i zatvorenom položaju. Općenito postoje dvije izvedbe, a to su višestupne i jednostupne.



Slika 4.2. Izvedbe rastavljača za napone iznad 35 kV

a – okretni rastavljač s krajnjim rastavljanjem

b – okretni rastavljač sa središnjim rastavljanjem

c – trostupni rastavljač sa okretnim rastavljanjem

d – rastavljač koji ima okomito rastavljanje

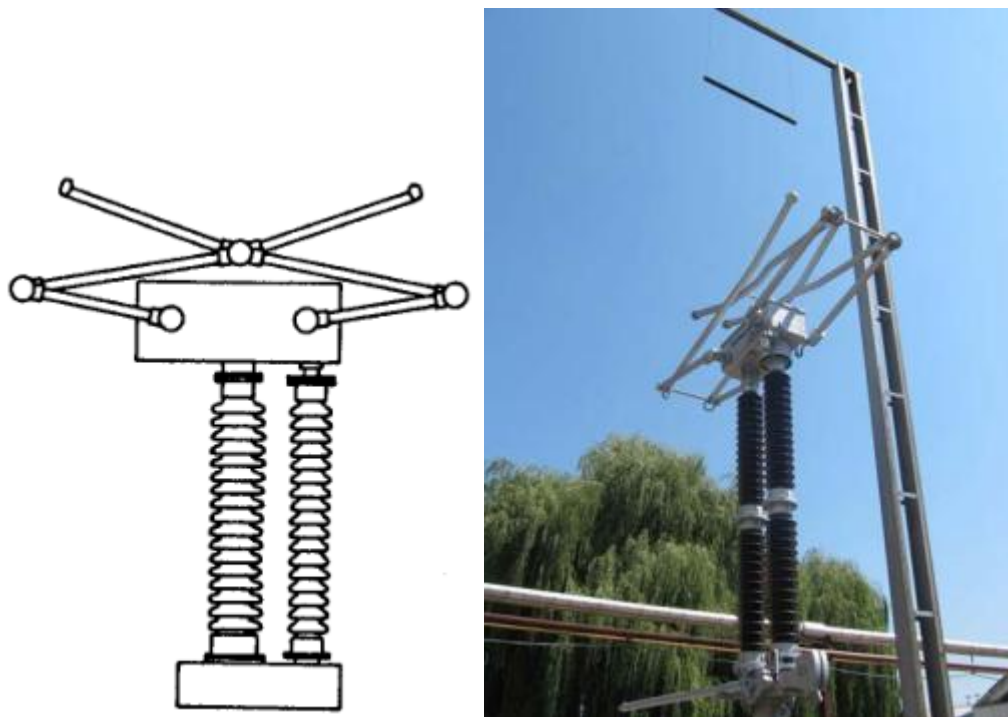
f – rastavljač sa srednji pomičnim izolatorom koji se pomiče između dva krajnja izolatora

Na slici 4.3. prikazan je okretni rastavljač sa središnjim rastavljanjem za 110 kV (literatura: prof. dr. sc. Ante Marušić - Sklopni i zaštitni uređaji)



*Slika 4.3. Okretni rastavljači za visoke napone*

Najmanju površinu treba jednostupni rastavljač (slika 4.4) koji ima jedan izolator, ali njihova izvedba je kompliciranija (literatura: prof. dr. sc. Ante Marušić - Sklopni i zaštitni uređaji)



*Slika 4.4. Prikaz pantografskog rastavljača*

Uklapanje i isklapanje rastavljača svih triju faza provodi se istovremeno i to ručno, pneumatski i električki. Ručno (fizički se mora doći do rastavljača) provodi se preko pluga koji je povezan s

osovinom rastavljača. Kod pneumatskog upravljanja (upravljanje je moguće iz komandne prostorije) komprimirani zrak pokreće osovinu rastavljača. Električki upravljanje je pomoću motora koji zakreće osovinu rastavljača.

#### 4.2. Izbor rastavljača

Izbor rastavljača vrši se u odnosu na nazivni napon, nazivnu struju, uz kontrolu s obzirom na udarnu struju kratkog spoja (mehanička čvrstoća) i s obzirom na struju kratkog spoja mjerodavnu za ugrijavanje (dopušteni porast temperature). Mjerodavna struja za izbor rastavljača je maksimalna struja koja u normalnom pogonu teče kroz rastavljač. Što je nazivni napon veći to je manji broj vrsta rastavljača, jer su za visoke napone materijalni troškovi za kontakte i vodljive dijelove manji u usporedbi sa troškovima za izolatore i postolja. Zato se za visoke napone, proizvodi samo jedan tip rastavljača i to za najveću nazivnu struju koja se može pojaviti.

*Tablica 4.1 Izvedba rastavljača s obzirom na nazivnu struju*

10	35	110	220	kV
200	-	-	-	A
400	400	-	-	A
600	600	600	600	A
1000	1000	-	-	A
2000	2000	-	-	A
3000	-	-	-	A
4000	-	-	-	A
6000	-	-	-	A

Nakon odabira rastavljača prema nazivnoj struji, moramo odabrani rastavljač kontrolirati s obzirom na ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja i s obzirom na mehanička naprezanja. Udarnom strujom se određuju mehanička naprezanja, dok je izdržljivost rastavljača ovisna o njegovoj konstrukciji. Tvornice koje proizvode rastavljače određuju tjemenu vrijednost struje kratkog spoja, kao i struju mjerodavnu za ugrijavanje koju rastavljač može izdržati 1 sekundu. Ukoliko kratki spoj traje dulje od 1 sekunde onda se dozvoljena vrijednost struje mjerodavne za ugrijavanje određuje izrazom 4.1

$$I_t = \frac{I_{t1}}{\sqrt{t}} \quad (4.1)$$

pri čemu je  $I_{t1}$  dopuštena struja kroz 1 sekundu, a  $t$  vrijeme trajanja kratkog spoja.

*Tablica 4.2 Dopuštena udarna struja i struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme 1 sekunde, s obzirom na nazivnu struju rastavljača*

Nazivna struja rastavljača	Dopuštena udarna struja	Dopuštena struja kroz 1 s
A	kA	kA
200	25	15
400	35	21
600	50	30
1000	100 (150)*	60 (75)*
2000-6000	150	75

\*pojačana izvedba

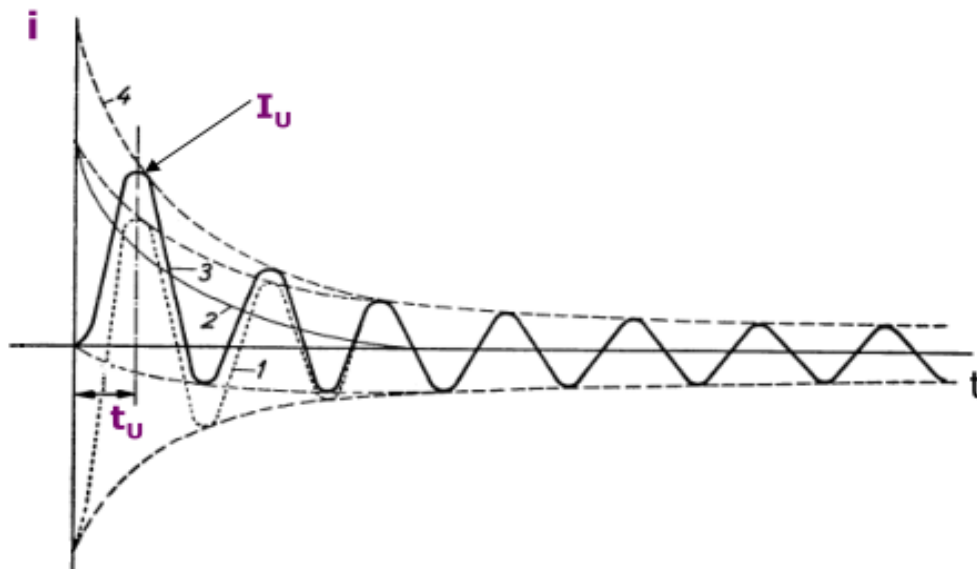
Ako se ustnovi da rastavljač, odabran prema najvećoj struji u normalnom pogonu, ne može izdržati ili mehanička naprezanja ili ugrijavanje za vrijeme kvara, tada se odabire rastavljač veće nazivne struje kako bi se spriječilo, u slučaju kratkog spoja, njegovo oštećenje.

## 5. KRATKI SPOJ

### 5.1 Općenito o kratkom spoju

Kratki spoj je pojava koja se javlja zbog namjernog ili nenamjernog dodirivanja dvaju ili više dijelova koji su pod naponom zbog čega je električni potencijal između tih točaka jednak nuli. Kod pojave kratkog spoja razlikujemo prekidnu struju, udarnu struju i struju mjerodavnu za ugrijavanje. Veličina tih struja je vrlo bitna jer se pomoću njihovih vrijednosti dimenzioniraju opreme rasklopnog postrojenja, dimenzionira se sustav uzemljenja, podešavaju se relejne zaštite. Kako bi se ostvarila pravilna zaštita od kratkog spoja potrebno je poznavati prilike sustava u normalnom režimu rada, te kod pojave kvara i smetnji. Zatim je potrebno napraviti proračune struja kratkog spoja i proračune dinamičke stabilnosti.

Posljedice koje kratki spoj donosi ovisi o lokaciji i snazi kratkog spoja, te o trajanju i vrsti kratkog spoja. Na mjestu kratkog spoja pojavljuje se električni luk koji razara izolaciju, tali vodič te izaziva požar. Na vodičima na kojim se desio kratki spoj dolazi do elektrodinamičkih sila, koje mogu uzrokovati odspajanje kabela i deformaciju sabirnica i previsokih temperatura. Struju kratkog spoja u trenutku nastanka kratkog spoja čine i izmjenična i istosmjerna komponenta koje se sa trajanjem kratkog spoja smanjuju ovisno o jačini izvora koji napaja mjesto kvara te o vrijednosti radnog i reaktivnog otpora.

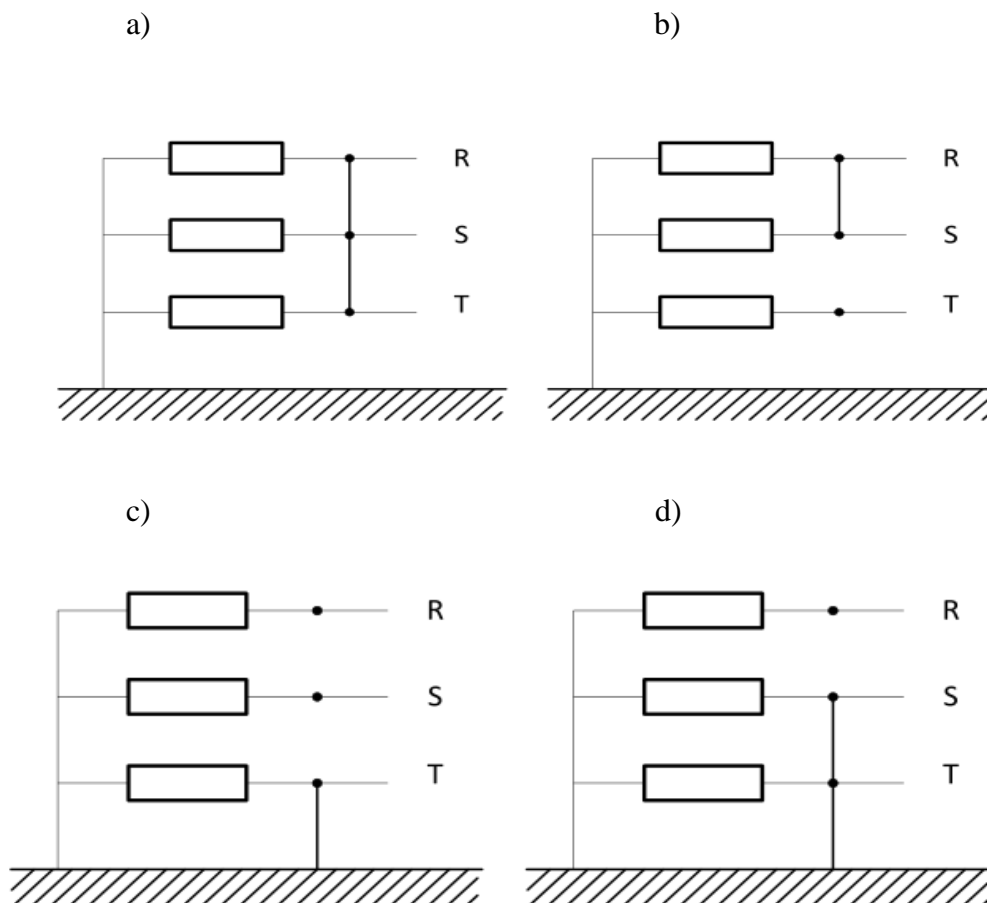


Slika 5.1. Struja kratkog spoja u slučaju kratkog spoja blizu generatora

- 1 - Izmjenična komponenta
- 2 - Istosmjerna komponenta
- 3 - Rezultantna struja kratkog spoja
- 4 - Envelopa rezultatne struje
- $I_u$  - udarna struja
- $t_u$  - vrijeme do pojave udarne struje

## 5.2. Vrste kratkih spojeva

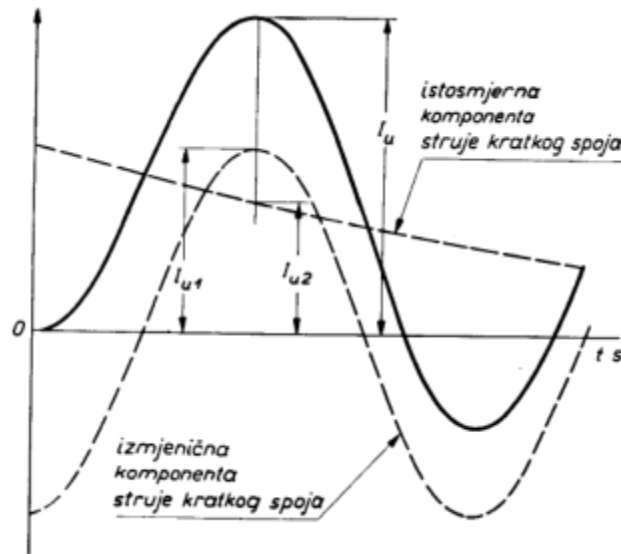
U trofaznim mrežama imamo četiri vrste kratkih spojeva: jednopolni, dvopolni, dvopolni kratki spoj sa zemljom i trolpolni.



Slika 5.2. Vrste kratkih spojeva: a) trolpolni kratki spoj; b) dvopolni kratki spoj; c) jednopolni kratki spoj; d) dvopolni kratki spoj sa zemljom

### 5.3. Udarna struja kratkog spoja

Udarna struja kratkog spoja  $I_u$  je najveća vrijednost koju struja kratkog spoja postigne od trenutka kada je kratki spoj nastao. Maksimalna trenutna vrijednost struje pojavit će se kada kratki spoj nastane u trenutku kada je napon jednak nuli, jer će se tada pojaviti maksimalna istosmjerna komponenta struje kratkog spoja.



Slika 5.3. Udarna struja kratkog spoja

$I_u$  – tjemena vrijednost udarne struje

$I_{u1}$  – izmjenična komponenta udarne struje

$I_{u2}$  – istosmjerna komponenta udarne struje

Poznavanje vrijednosti udarne struje je vrlo bitno, jer se preko nje određuju maksimalna dinamička naprezanja dijelova postrojenja i uređaja, jer te uređaje se treba dimenzionirati tako da podnesu maksimalna naprezanja.

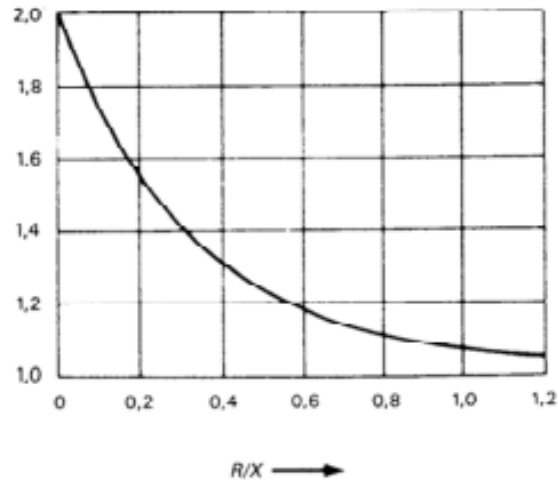
Formula za određivanje udarne struje  $I_u$  je (prema IEC 909 standardu)

$$I_u = kI_k''\sqrt{2} \quad (5.1)$$

pri čemu je  $I_k''$  efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja neposredno nakon njenog nastanka. Faktor  $k$  opisuje kako se smanjuje istosmjerna komponenta struje kratkog spoja u ovisnosti o omjeru djelatnog otpora  $R$  i reaktancije  $X$  i jednak je



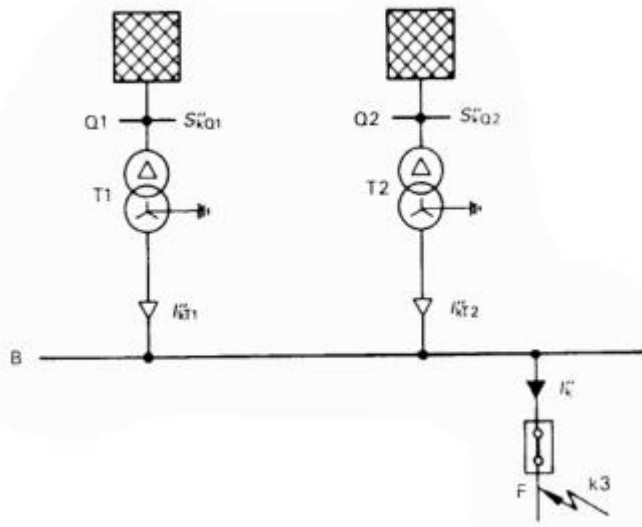
$$k = 1.02 + 0.98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (5.2)$$



Slika 5.4. Ovisnost faktora  $k$  o omjeru  $R$  i  $X$

Navedene relacije odnose se samo na mreže koje se napajaju iz jednog izvora tj. sinkronog generatora.

Ako se radi o mreži koja nije zamkasta, a mjesto kratkog spoja se napaja iz više izvora, tada je udarna struja kratkog spoja jednaka zbroju komponenti udarne struje iz pojedinih grana.



$$I_u = I_{uT1} + I_{uT2} \quad (5.3)$$

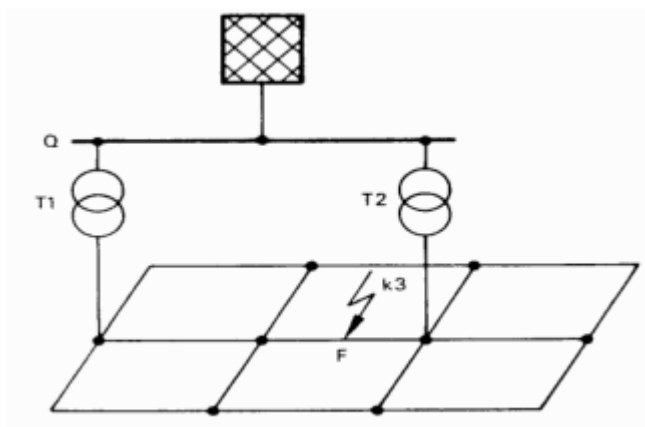
$$I_{uT1} = k_1 \sqrt{2} I_{kT1}'' \quad (5.4)$$

$$I_{uT2} = k_2 \sqrt{2} I_{kT2}'' \quad (5.5)$$

Slika 5.5. Shema kada je mjesto kratkog spoja napajano iz više izvora

Koeficijente  $k_1$  i  $k_2$  potrebno je odrediti na temelju gore navedenog dijagrama (slika 5.4.) za svaku granu posebno.

Kod mreže zamkaste strukture se udarna struja kratkog spoja može računati na tri načina.



Slika 5.5. Shema kratkog spoja u mreži zamkaste strukture

Metoda A, koja se koristi kada nije potrebna velika točnost, a bazira se na tome da se faktor  $k$  određuje na temelju najmanjeg iznosa omjera  $R/X$  skupa grana kroz koje protječe barem 80% cijelokupne struje kratkog spoja.

Metoda B kod koje se faktor  $k$  određuje preko ukupne direktne impedancije  $Z_{duk}$  zamkaste mreže pri čemu je u niskonaponskim mrežama taj faktor ograničen na 1.8, a u visokonaponskim mrežama na 2.0.

$$k_B = 1.15 k \quad (5.6)$$

Metoda C koja se svodi na određivanje faktora  $k$  preko omjera  $R/X$  koji je jednak

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} + \frac{f_c}{f} \quad (5.7)$$

pri čemu su  $R_c$  i  $Z_c$  djelatni otpor i impedancija direktnog sustava pri  $f_c = 20$  Hz.

#### 5.4. Prekidna struja kratkog spoja

Prekidna struja kratkog spoja efektivna je vrijednost one struje kratkog spoja koja, u trenutku kada se kontakti otvaraju, protječe kroz prekidač.

Formula kojom se računa prekidna struja kratkog spoja (izraz 5.8) je

$$I_r = \sqrt{I_k''^2 + I_a^2} \quad (5.8)$$

pri čemu je  $I_k''$  izmjenična komponenta struje kratkog spoja.  $I_a$  je istosmjerna komponenta struje kratkog spoja u trenutku kada se kontakti prekidača razdvajaju. Kod određivanja prekidne struje obično se ne određuje veličina istosmjerne komponente, nego se efektivna vrijednost izmjenične komponente množi sa faktorom koji ovisi o vremenu isklapanja prekidača (većim od 1 ukoliko se radi o brzim isklapanjima, odnosno manjim od 1 ukoliko se radi o relativno dugom vremenu isklapanja). Međutim, izbor prekidača se ne vrši prema vrijednosti prekidne struje, već prema rasklopnoj snazi. Rasklopna snaga jednog pola sklopke računa se prema sljedećoj relaciji:

$$S_1 = I_r V_n \quad (5.9)$$

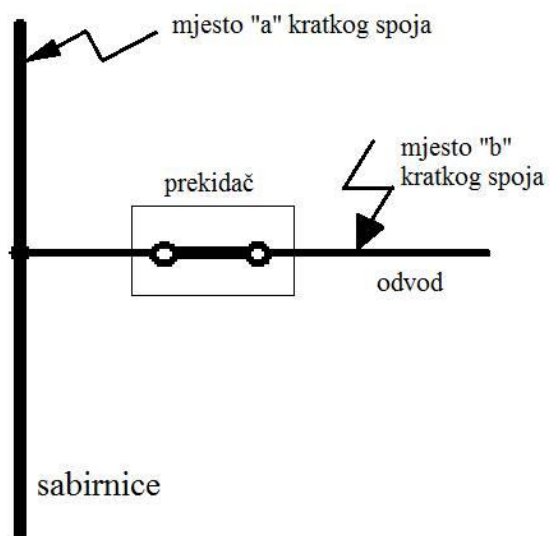
Svaki od tri pola sklopke mora biti tako dimenzioniran da izdrži najveću rasklopnu struju u jednoj od faza. Zbog toga, rasklopna snaga sklopke jednaka je

$$S = 3I_{r \max} V_n = \sqrt{3} I_{r \max} U_n \quad (5.10)$$

gdje je  $I_{r \max}$  najveća prekidna struja u jednoj od faza, a  $U_n$  linijski napon mreže, odnosno  $V_n$  fazni napon.

#### 5.5. Rasklopna snaga kratkog spoja u odnosu na mjesto nastanka kratkog spoja

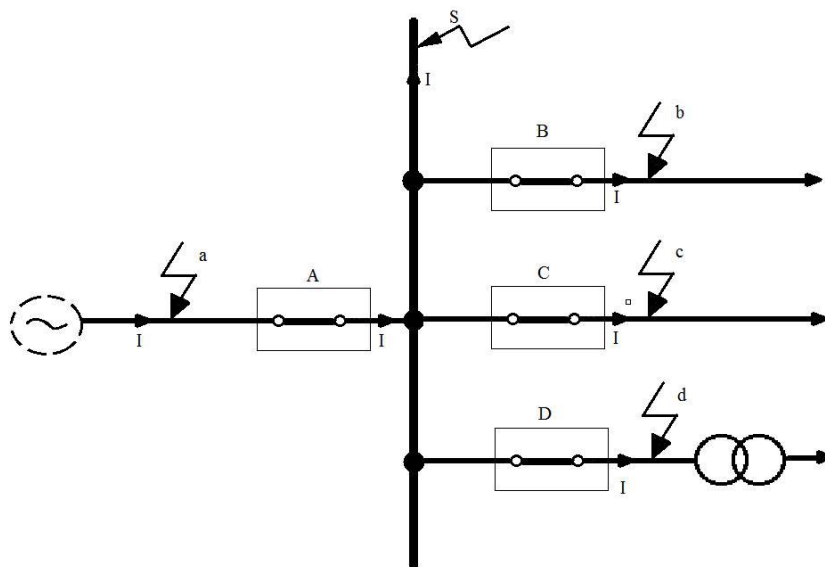
Prekidač mora biti odabran tako da je u mogućnosti iskloniti najveću rasklopnu snagu koja odgovara najvećoj prekidnoj struji kratkog spoja. Kako bi se odredila ta najveća prekidna struja, kreće se od pretpostavke da se najveća struja pojavljuje kod kratkog spoja na sabirnicama, kao i u odvodu gdje se nalazi prekidač, ako je kratki spoj nastao odmah nakon prekidača.



Slika 5.6. Mjesta kratkog spoja preko kojih se određuje rasklopna snaga prekidača

Imamo nekoliko tipičnih situacija mjesta kratkog spoja koje se pojavljuju u mrežama.

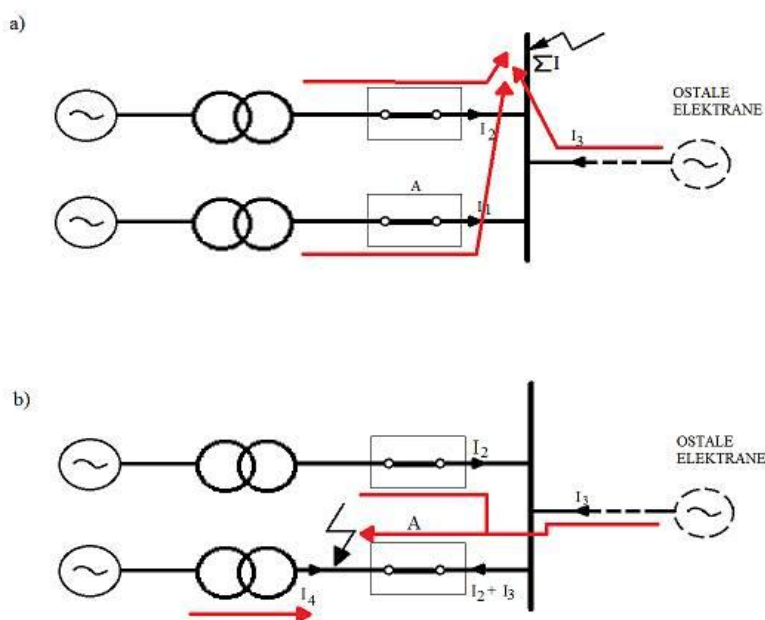
1. Slučaj:



Slika 5.7. Nastanak kratkog spoja u odvodima koji opskrbljuju prekidače

Za prekidače B, C i D, nalaze se u vodovima koji samo snabdijevaju potrošače, promatramo kratki spoj na mjestima b, c i d, jer u tom slučaju struja kratkog spoja ide kroz prekidač. Reaktancija između sabirnice i mjesta b, c i d je zanemarivo mala, pa se veličina struje kratkog spoja neće promijeniti ako pretpostavimo da je kratki spoj nastao na sabirnici. U slučaju kada se napajanje izvodi preko jednog voda (kao na slici), za prekidač A ima smisla pretpostavka da je kratki spoj nastao na sabirnici.

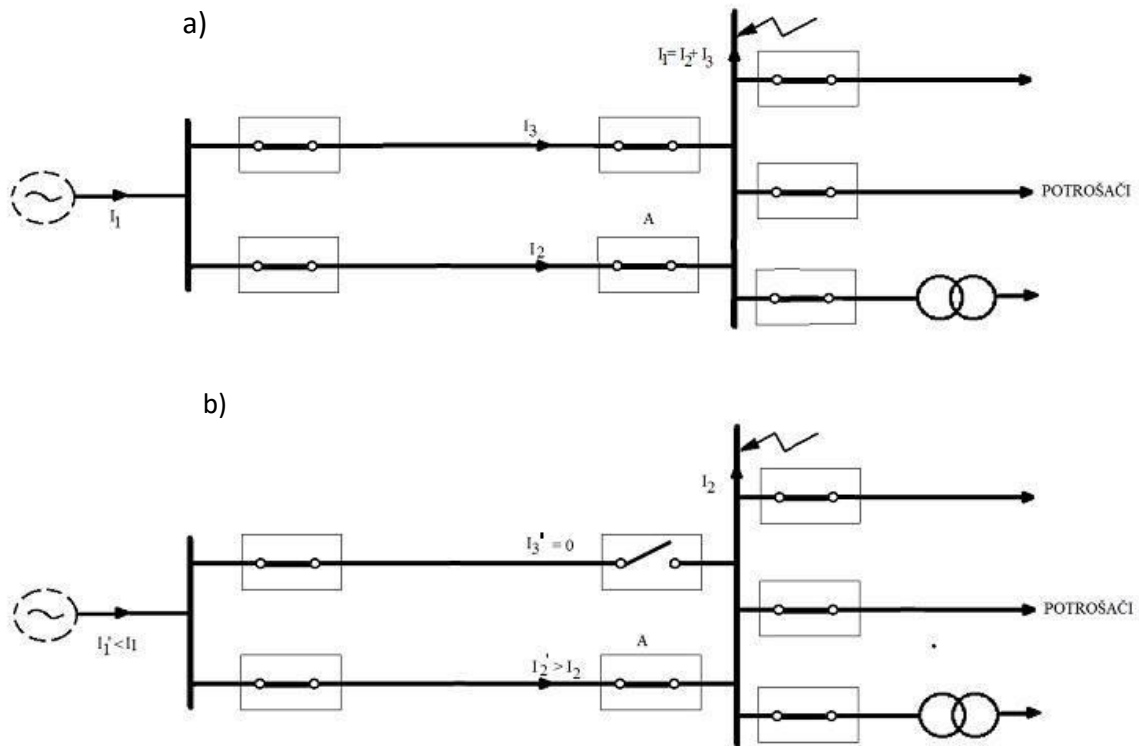
## 2. Slučaj:



Slika 5.8. Shema za određivanje rasklopne snage prekidača u slučaju kratkog spoja na sabirnicama (slika a)) i neposredno iza prekidača (slika b))

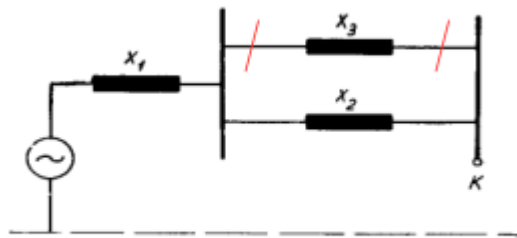
Uz pretpostavku nastanka kratkog spoja na sabirnici, vidimo da kroz prekidač A protječe struja  $I_1$  koju proizvodi generator, koji je preko prekidača A spojen sa sabirnicom (slučaj a)). Međutim, ako je kratki spoja nastao neposredno iza prekidača na strani generatora (slučaj b)), tada kroz prekidač A protječe struja iz drugog generatora  $I_2$  i struja iz ostalih elektrana  $I_3$  ( $I_2+I_3$ ). Kod izbora prekidača, gleda se veća od tih dviju struja.

3. slučaj



Slika 5.9. Nastanak kratkog spoja, u dvostrukom vodu napajanog sa jedne strane, na sabirnicama kada su: a) svi prekidači uklopljeni; b) jedna prekidač isklopljen

U slučaju a), kada je kratki spoja nastao na sabirnici, a oba su prekidača uklopljena, kroz prekidač A protječe samo dio struje  $I_2$  i jednaka je izrazu (5.11).



Slika 5.10. Ekvivalentna shema u slučaju kratkog spoja na sabiricama u shemi spoja na slici 5.9.

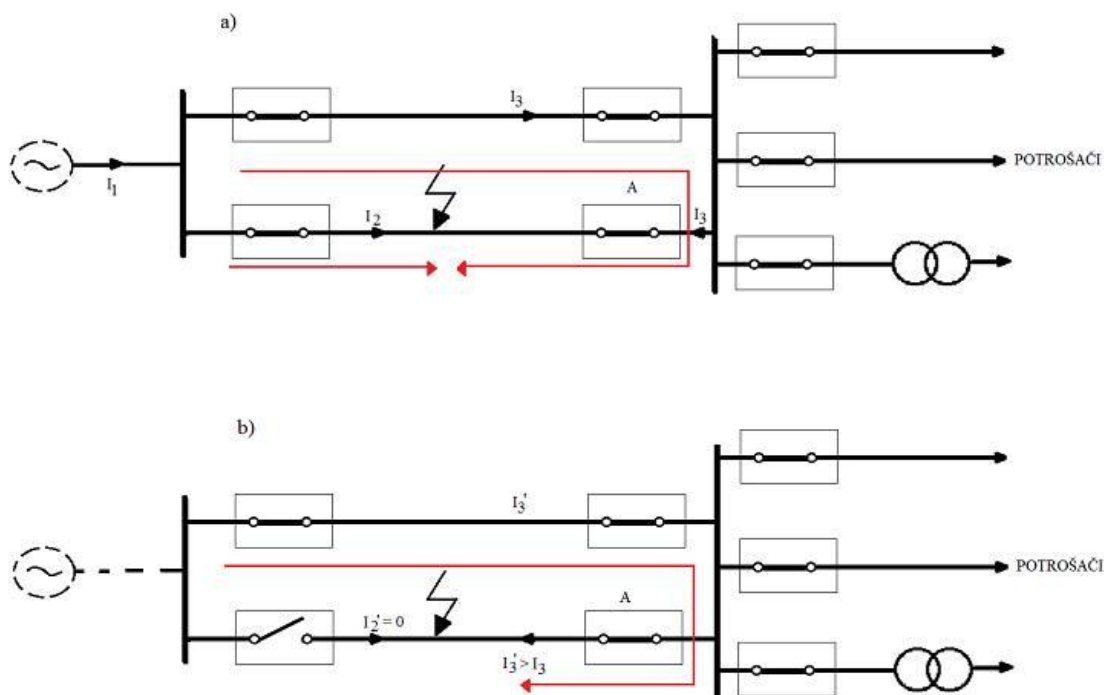
$$I_2 = \frac{V}{\frac{X_1 X_2}{X_3} + X_1 + X_2} \quad (5.11)$$

U slučaju kada se jedan prekidač isklopi (slika 5.9. b)), što znači da je  $X_3 = \infty$ , kroz prekidač A protječe struja  $I_2'$  koja iznosi

$$I_2' = \frac{V}{X_1 + X_2} \quad (5.12)$$

što znači da je  $I_2' > I_2$ .

Kada se kratki spoj dogodi na strani odvoda, neposredno iza prekidača, tada kroz prekidač A protječe struja  $I_3$  (slika 5.11. a)). U slučaju kada je prekidač na drugom kraju voda isklopljen, kroz prekidač A protječe struja  $I_3'$  (slika 5.11. b)).



Slika 5.11. Nastanak kratkog spoja, u dvostrukom vodu napajanog sa jedne strane, neposredno iza prekidača u slučaju kada su: a) svi prekidači uklopljeni; b) jedan prekidač isklopljen

Struja  $I_3$  jednaka je

$$I_3 = \frac{V}{\frac{X_1 X_3}{X_2} + X_1 + X_3} \quad (5.13)$$

a struja  $I_3'$  iznosi

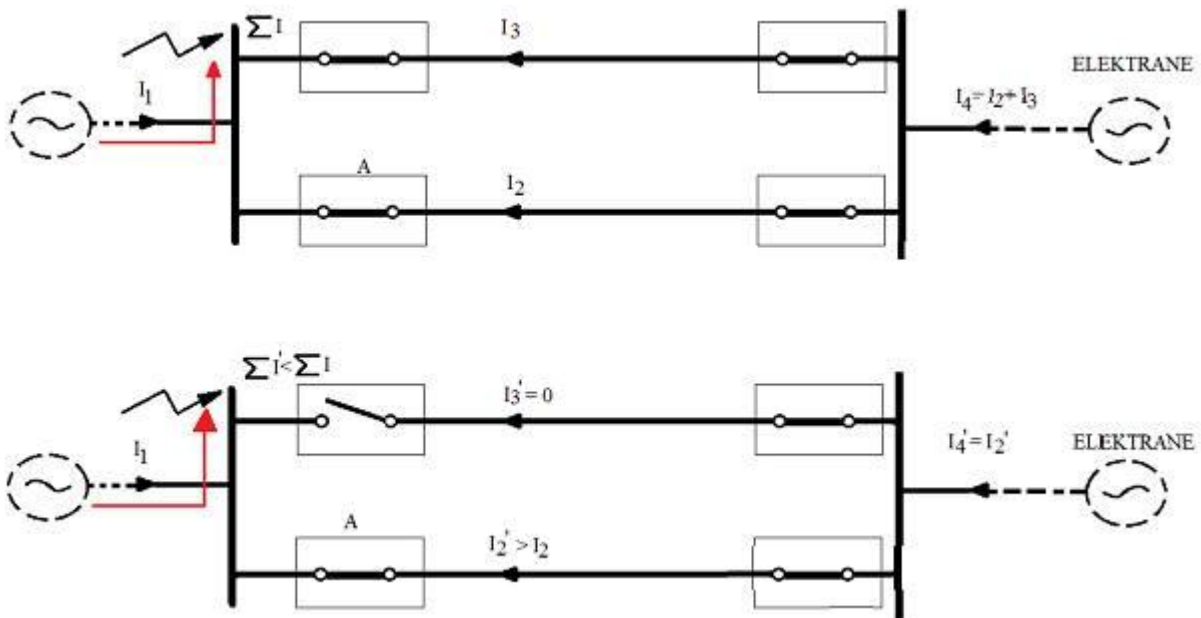
$$I_3' = \frac{V}{X_1 + X_3} \quad (5.14)$$

Što znači da je  $I_3' > I_3$ .

U slučaju kada postoji dvostruki vod napajan sa jedne strane, prekidna struja će biti veća uz pretpostavku da je jedan od dva voda isklapljen. Da li će struja kratkog spoja biti veća u slučaju kratkog spoja na strani odovoda ili u slučaju kratkog spoja na sabirnicama, ne može se reći unaprijed, jer ovisi o reaktancijama svakog voda.

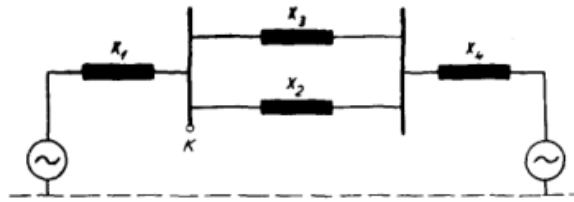
#### 4. Slučaj

Zadnji slučaj je slučaj kada se kratki spoj dogodi na sabirnicama ili na jednom od dva voda koji su napajani sa dve strane. Ako se kratki spoj desi na sabirnicama uz uvjet da su svi prekidači uključeni, kroz prekidač A protjecat će struja  $I_2$ . Kada se isklupi vod u kojem se ne nalazi prekidač A, kroz prekidač A protjecat će struja  $I_2'$  ( $I_2 + I_3$ ).



Slika 5.14. Nastanak kratkog spoja, kod dvostrukog voda napajanog sa dvije strane, na sabirnicama kada su sve sklopke uključene i kada je jedna sklopka isklapljena





Slika 5.15. Ekvivalentna shema u slučaju kratkog spoja na sabiricama u shemi spoja na slici 5.14.

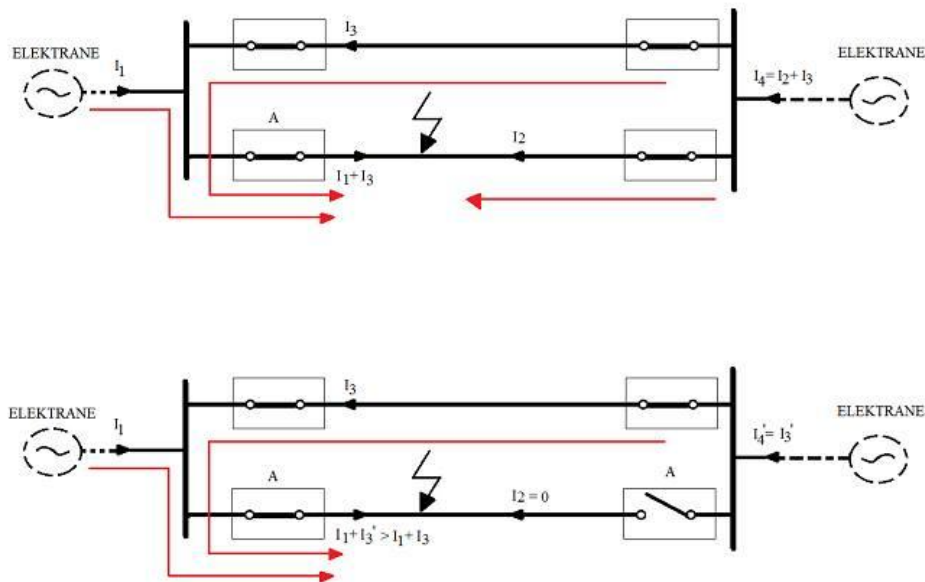
Iz ekvivalentne sheme određujemo struje  $I_2$  i  $I_2'$ .

$$I_2 = \frac{V}{\frac{X_2 X_4}{X_3} + X_2 + X_4} \quad (5.15)$$

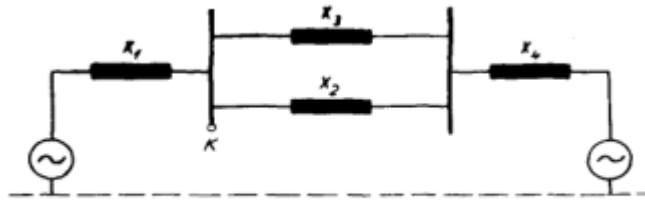
$$I_2' = \frac{V}{X_2 + X_4} \quad (5.16)$$

Iz prethodnih jednažbi vidljivo je da je  $I_2' > I_2$ .

Kada je mjesto kratkog spoja na strani odvoda, neposredno iza prekidača, kroz prekidač A protiču struje iz elektrana  $I_1$  i  $I_3$ .



Slika 5.16. Nastanak kratkog spoja, kod dvostrukog voda napajanog sa dvije strane, neposredno iza prekidača kada su sve sklopke uklopljene i kada je jedna sklopka isklopljena



Slika 5.17. Ekvivalentna shema u slučaju kratkog spoja na sabiricama u shemi spoja na slici 5.16.

Ta struja jednaka je

$$I_1 + I_3 = \frac{V}{X_1} + \frac{V}{\frac{X_3 X_4}{X_2} + X_3 + X_4} \quad (5.17)$$

U slučaju kada je isklapljen drugi vod, kroz prekidač A protječe struja  $I_1 + I_3'$ , te je jednaka

$$I_1 + I_3' = \frac{V}{X_1} + \frac{V}{X_3 + X_4} \quad (5.18)$$

Dakle, veća rasklopna struja, u slučaju dvostrukog voda napajano sa dvije strane, biti će u slučaju kad je u trenutku kratkog spoja jedan od vodova isklapljen.

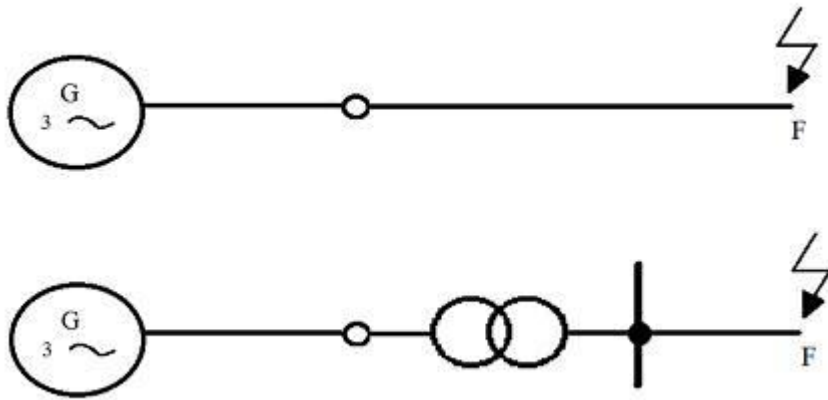
## 5.6. Propisi za određivanje rasklopne snage

Prema IEC 909 propisima, glavni uvjet za određivanje prekidne struje (snage) je određivanje mjesta nastanka kratkog spoja. Kada se radi o kratkom spoju koji je udaljen od generatora, što znači da se izmjenična komponenta sporo prigušuje, rasklopna struja je jednaka efektivnoj vrijednosti izmjenične komponente struje kratkog spoja u početnim trenucima kratkog spoja.

$$I_r = I''_k \quad (5.19)$$

U slučaju kada se radi o kratkom spoju koji je nastao u blizini generatora, što znači da se izmjenična komponenta brzo prigušuje, rasklopna struja se određuje na sljedeće načine:

1. Slučaj kada se mjesto kratkog spoja napaja iz jednog izvora

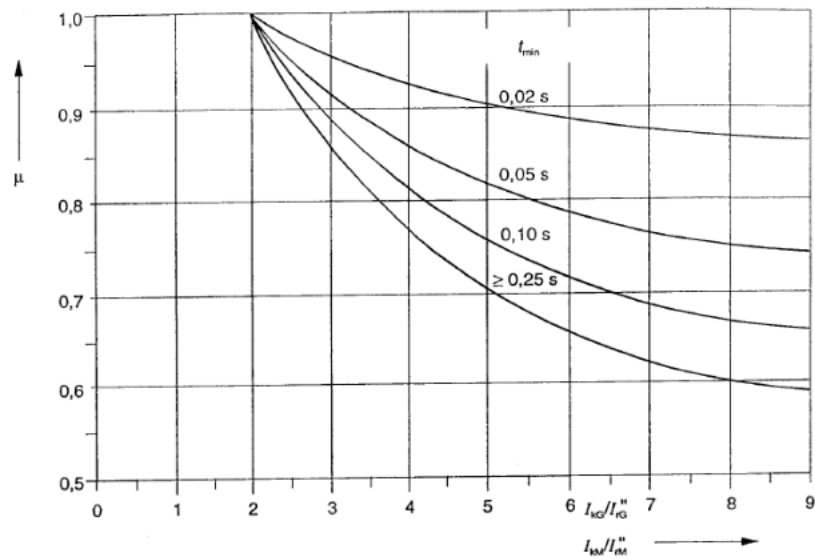


Slika 5.18. Mjesto kratkog spoja je napajano iz samo jednog izvora

U ovome slučaju, rasklopna struja jednaka je umnošku faktora  $\mu$  i struje kratkog spoja

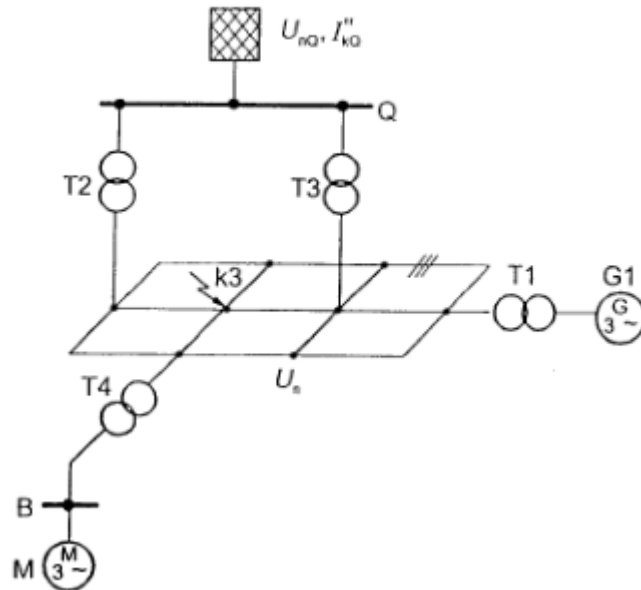
$$I_r = \mu I''_{k3} \quad (5.20)$$

pri čemu koeficijent  $\mu$  ovisi o najkraćem vremenu od trenutka kada kratki spoj nastaje do trenutka kad se kontakti razdvoje ( $t_{\min}$ ) i omjeru struje kratkog spoja (generatora/motora) i nazivne struje (generatora/motora).



Slika 5.19. Ovisnost faktora  $\mu$  o omjeru struje kratkog spoja i nazivne struje

2. Slučaj kada je mjesto kratkog spoja napajano iz više izvora u mreži koja je zamkaste strukture



Slika 5.20. Shema nastanka kratkog spoja napajanog iz više izvora u zamkastoju mreži

Kod ovakvog slučaja može se uzeti da je rasklopna struja približno jednaka struji kratkog spoja.

$$I_r = I''_{k3} \quad (5.21)$$

Kada se govori da je najnepovoljnija vrsta kvara trolpolni kratki spoj, uzima se da je  $\mu < 1$ . U slučaju da je nepovoljnija vrsta kvara jednopolni kratki spoj uzima se da je  $\mu = 1$ .

### 5.7. Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja

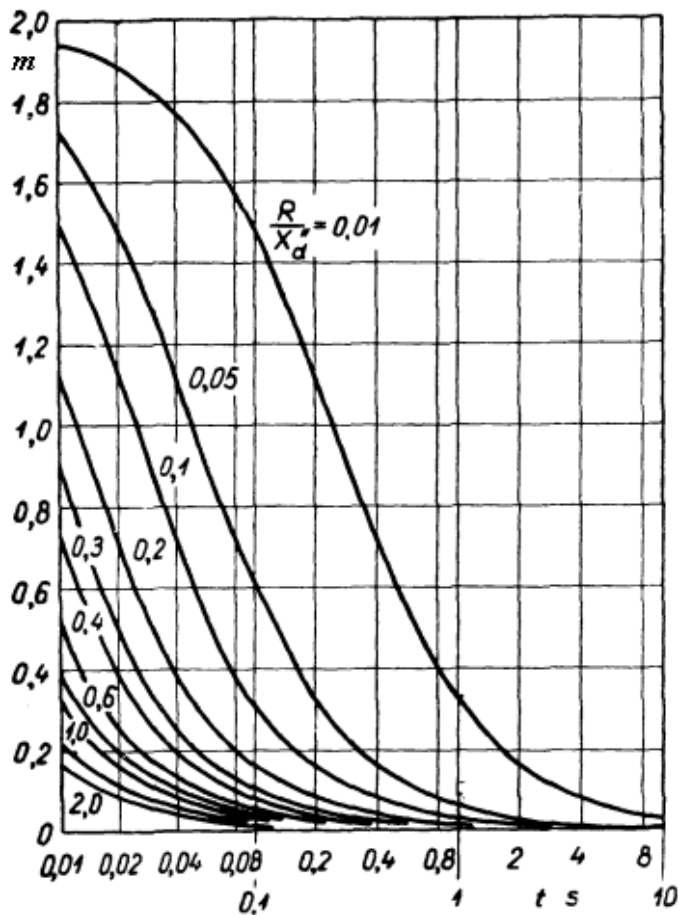
Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme kratkog spoja je efektivna vrijednost struje kratkog spoja, zbog toga što je efektivna vrijednost izmjenične struje tolika, da bi proizvela istu toplinu kao istosmjerna struja iste veličine.

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i^2 dt} \quad (5.22)$$

Nakon integriranja dobijemo da je

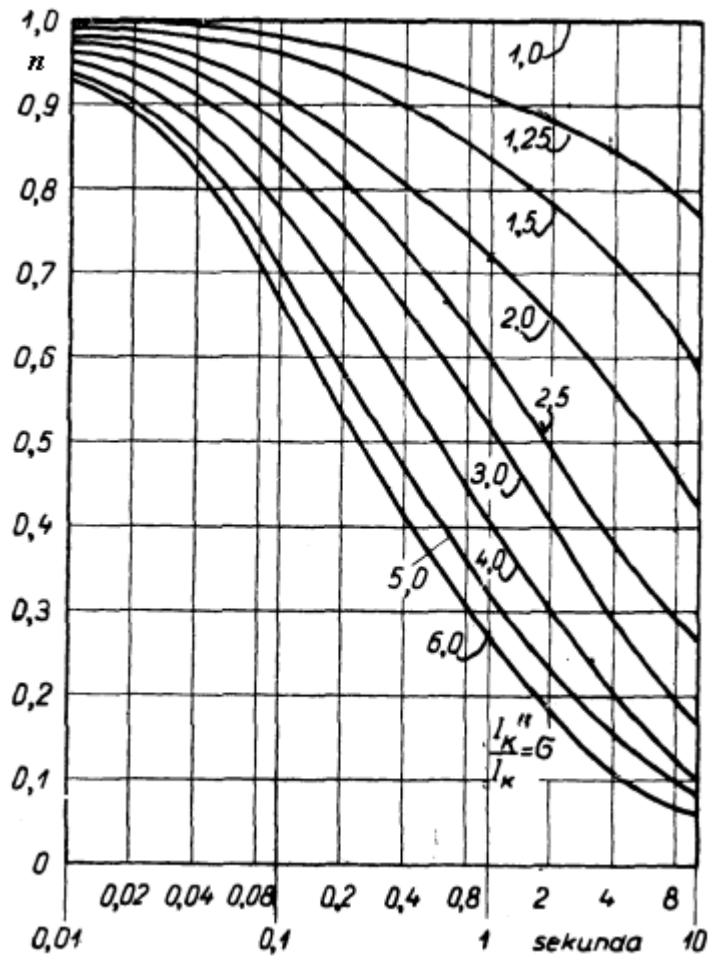
$$I_t = I''_k \sqrt{m + n} \quad (5.23)$$

gdje je  $I''_k$  efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja za najnepovoljniju vrstu kvara. Koeficijenti  $n$  i  $m$  se iščitavaju iz sljedećih tablica.



Slika 5.21. Dijagram za određivanje faktora  $m$

Koeficijent  $m$  ovisi o omjeru  $R/X$  na mjestu kratkog spoja i prolaskom vremena trajanja kratkog spoja, on opada.

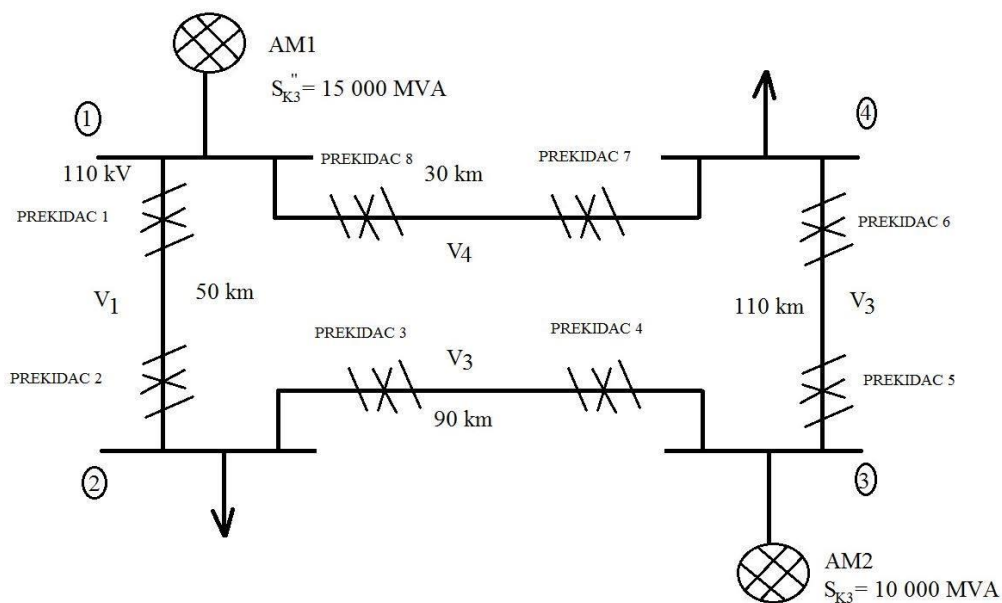


5.22. Dijagram za određivanje faktora  $n$

Koeficijent  $n$  ovisi o omjeru  $X_{dm}/X_{dg}''$  ( $X_{dm}$  je reaktancija mreže od priključnica generatora do mjesta kratkog spoja,  $X_{dg}''$  je početna reaktancija generatora) i trajanjem kratkog spoja on se smanjuje.

## 6. PRIMJER PREKIDAČA I RASTAVLJAČA U ZAMKASTOJ MREŽI

Za zamkastu mrežu na slici 6.1. odabrati prekidače i rastavljače ako su poznate vrijednosti faktora  $k=1.02$ ,  $m=0.4$  i  $n=1$ .



Slika 6.1. Zamkasta mreža

Zadane su vrijednosti:

Tablica 6.1. Podaci aktivnih mreža

ČVOR	$S''_{K3}$ [MVA]
1	15000
3	10000

Tablica 6.2 Podaci elektroenergetskih vodova

VOD	$X_1$ [ $\Omega/\text{km}$ ]	$l$ [km]
1	$j0,4250$	50
2	$j0,4060$	90
3	$j0,4210$	110
4	$j0,4120$	30

Riješenje:

$$Z_{AM1} = \frac{cU^2}{S''_{K3}} = j0,8873 \Omega$$

$$Z_{AM2} = \frac{cU^2}{S''_{K3}} = j1,331 \Omega$$

$$Z_{V1} = X_1 l_1 = j21,25 \Omega$$

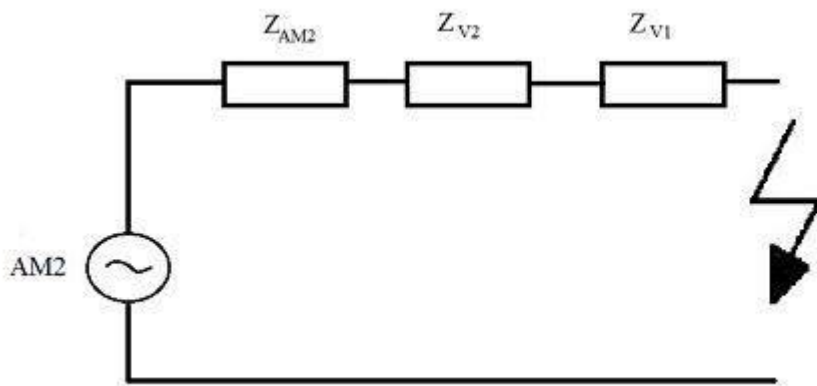
$$Z_{V2} = X_2 l_2 = j36,54 \Omega$$

$$Z_{V3} = X_3 l_3 = j46,31 \Omega$$

$$Z_{V4} = X_4 l_4 = j12,36 \Omega$$

Prekidač i rastavljač 1

1) Odsposi se vod V3 ili V4



$$Z_{uk} = Z_{AM1} + Z_{V2} + Z_{V1} = j59,121 \Omega$$

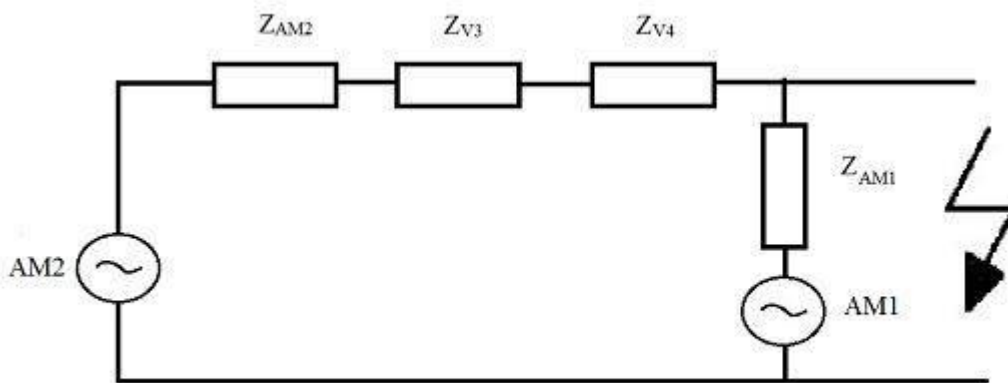
$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 1,182 \text{ kA}$$

$$I_{u1} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 2,088 \text{ kA}$$

$$I_{t1} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 1,398 \text{ kA}$$



2) Odspoji se V1 na drugom kraju



$$Z_1 = Z_{AM2} + Z_{V3} + Z_{V4} = j60,001 \Omega$$

$$Z_{uk} = \frac{Z_1 Z_{AM1}}{Z_1 + Z_{AM1}} = j0,8744 \Omega$$

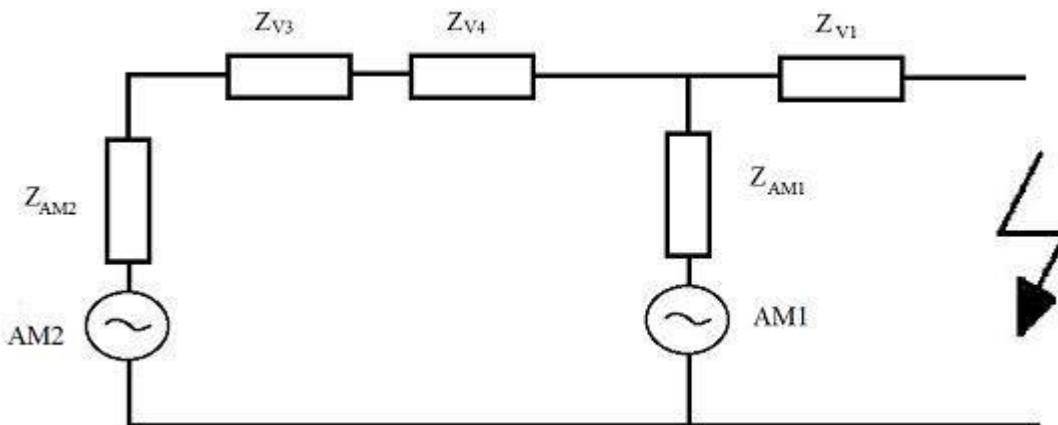
$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 79,894 \text{ kA}$$

$$I_{u2} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 115,25 \text{ kA}$$

$$I_{t2} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 94,532 \text{ kA}$$

Prekidač i rastavljač 2

3) Odspoji se vod V2



$$Z_1 = Z_{AM2} + Z_{V3} + Z_{V4} = j60,001 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 Z_{AM1}}{Z_1 + Z_{AM1}} = j0,8744 \Omega$$

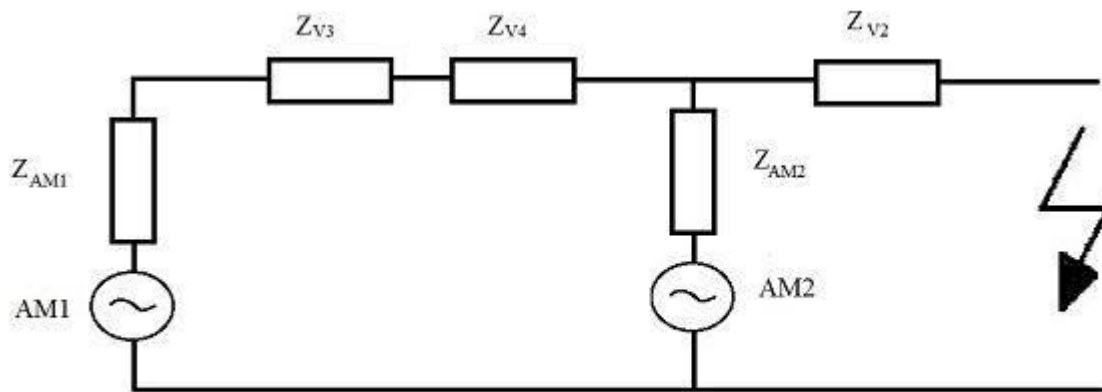
$$Z_{uk} = Z_1 + Z_2 = j22,12437 \Omega$$

$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 3,158 \text{ kA}$$

$$I_{u1} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 4,555 \text{ kA}$$

$$I_{t1} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 3,736 \text{ kA}$$

4) Odspoji se V1 na drugom kraju



$$Z_1 = Z_{AM1} + Z_{V3} + Z_{V4} = j59,5573 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 Z_{AM2}}{Z_1 + Z_{AM2}} = j1,302 \Omega$$

$$Z_{uk} = Z_2 + Z_{V2} = j37,842 \Omega$$

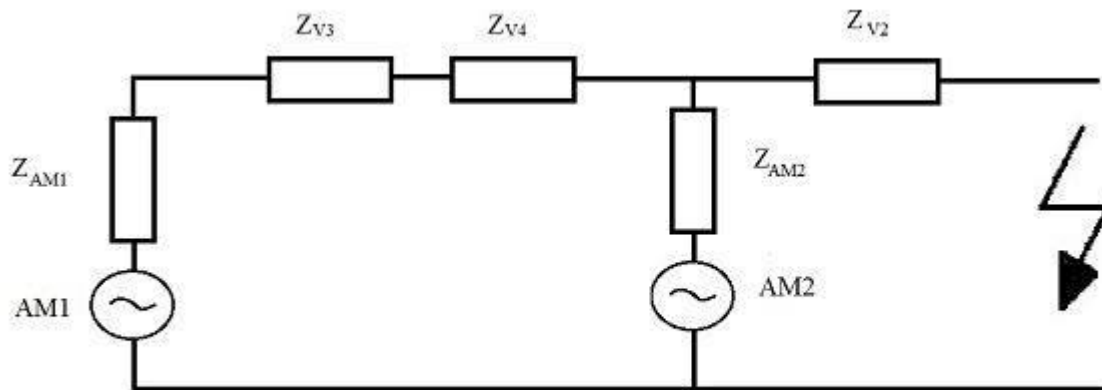
$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 1,846 \text{ kA}$$

$$I_{u2} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 2,663 \text{ kA}$$

$$I_{t2} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 2,1842 \text{ kA}$$

### Prekidač i rastavljač 3

1) Odspoji se vod V1



$$Z_1 = Z_{AM1} + Z_{V3} + Z_{V4} = j59,5573 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 Z_{AM2}}{Z_1 + Z_{AM2}} = j1,302 \Omega$$

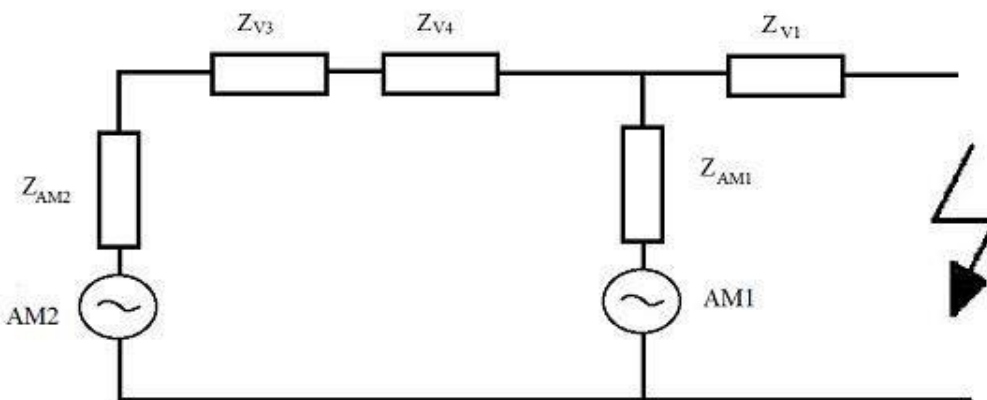
$$Z_{uk} = Z_2 + Z_{V2} = j37,842 \Omega$$

$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 1,846 \text{ kA}$$

$$I_{u1} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 2,663 \text{ kA}$$

$$I_{t1} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 2,1842 \text{ kA}$$

2) Odspoji se vod V2 na drugom kraju



$$Z_1 = Z_{AM2} + Z_{V3} + Z_{V4} = j60,001 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 Z_{AM1}}{Z_1 + Z_{AM1}} = j0,8744 \Omega$$

$$Z_{uk} = Z_{V1} + Z_2 = j22,124 \Omega$$

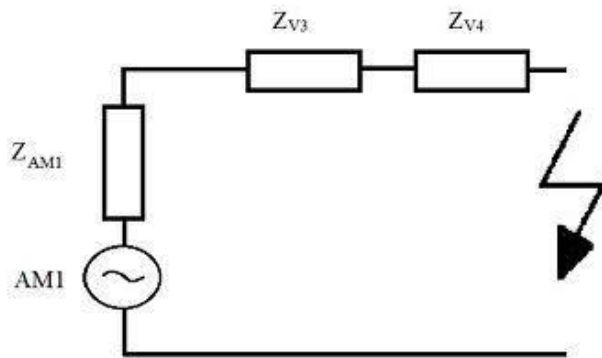
$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 3,158 \text{ kA}$$

$$I_{u2} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 4,555 \text{ kA}$$

$$I_{t2} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 3,737 \text{ kA}$$

Prekidač i rastavljač 4

1) Odspoji se vod V1 ili V2



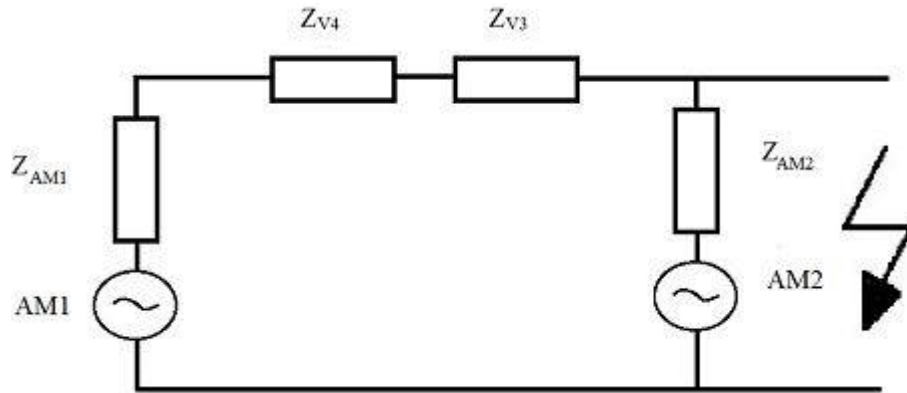
$$Z_{uk} = Z_{AM1} + Z_{V3} + Z_{V4} = j59,5573 \Omega$$

$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 1,173 \text{ kA}$$

$$I_{u1} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 1,692 \text{ kA}$$

$$I_{t1} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 1,388 \text{ kA}$$

2) Odspoji se vod V2 na drugom kraju



$$Z_1 = Z_{AM1} + Z_{V4} + Z_{V3} = j59,5573 \Omega$$

$$Z_{uk} = \frac{Z_1 Z_{AM2}}{Z_1 + Z_{AM2}} = j1,3015 \Omega$$

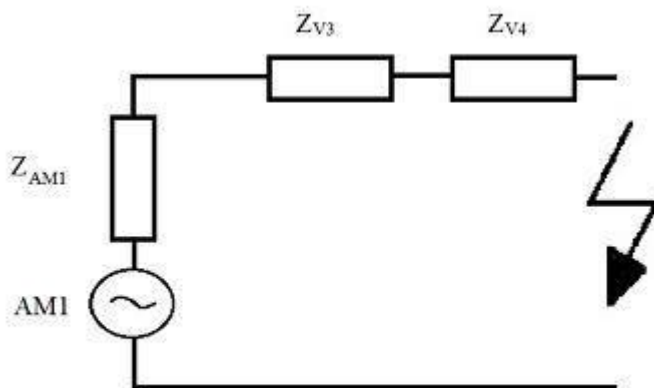
$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 53,676 \text{ kA}$$

$$I_{u2} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 77,427 \text{ kA}$$

$$I_{t2} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 63,51 \text{ kA}$$

Prekidač i rastavljač 5

1) Odspoji se vod V1 ili V2



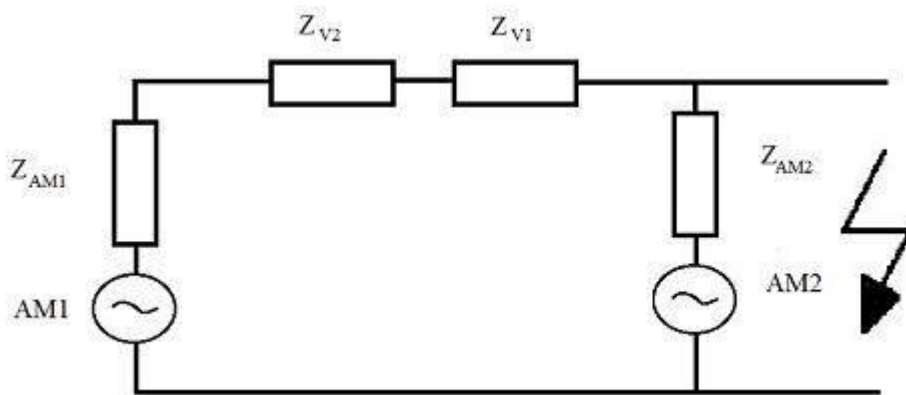
$$Z_{uk} = Z_{AM1} + Z_{V3} + Z_{V4} = j59,5573 \Omega$$

$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 1,173 \text{ kA}$$

$$I_{u1} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 1,692 \text{ kA}$$

$$I_{t1} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 1,388 \text{ kA}$$

2) Odspoji se vod V3 na drugom kraju



$$Z_1 = Z_{AM1} + Z_{V2} + Z_{V1} = j58,6773 \Omega$$

$$Z_{uk} = \frac{Z_1 Z_{AM2}}{Z_1 + Z_{AM2}} = j1,3015 \Omega$$

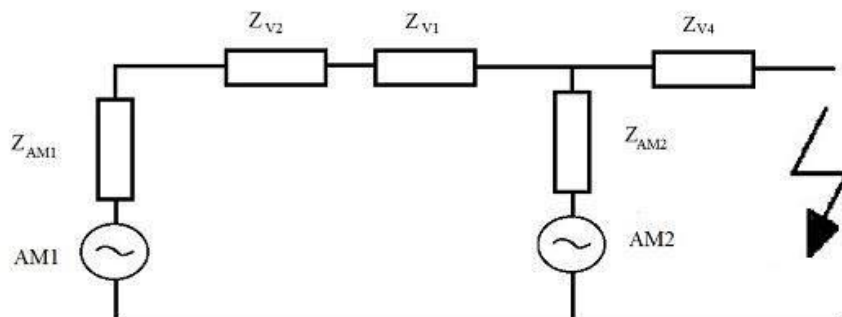
$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 53,676 \text{ kA}$$

$$I_{u2} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 77,427 \text{ kA}$$

$$I_{t2} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 63,51 \text{ kA}$$

Prekidač i rastavljač 6

1) Odspoji se vod V4



$$Z_1 = Z_{AM1} + Z_{V1} + Z_{V2} = j58,6773 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 Z_{AM2}}{Z_1 + Z_{AM2}} = j1,3015 \Omega$$

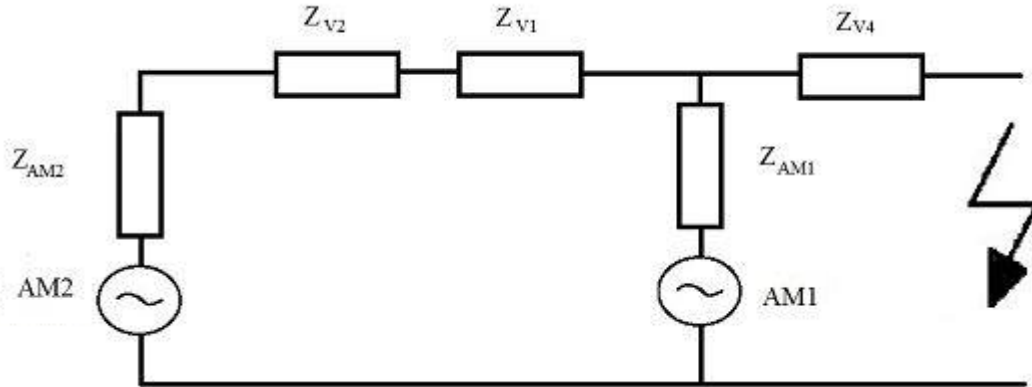
$$Z_{uk} = Z_2 + Z_{V3} = j47,6115 \Omega$$

$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 1,467 \text{ kA}$$

$$I_{u1} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 2,116 \text{ kA}$$

$$I_{t1} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 1,736 \text{ kA}$$

2) Odspoji se vod V3 na drugom kraju



$$Z_1 = Z_{AM2} + Z_{V1} + Z_{V2} = j59,121 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 Z_{AM1}}{Z_1 + Z_{AM1}} = j0,874 \Omega$$

$$Z_{uk} = Z_2 + Z_{V4} = j13,234 \Omega$$

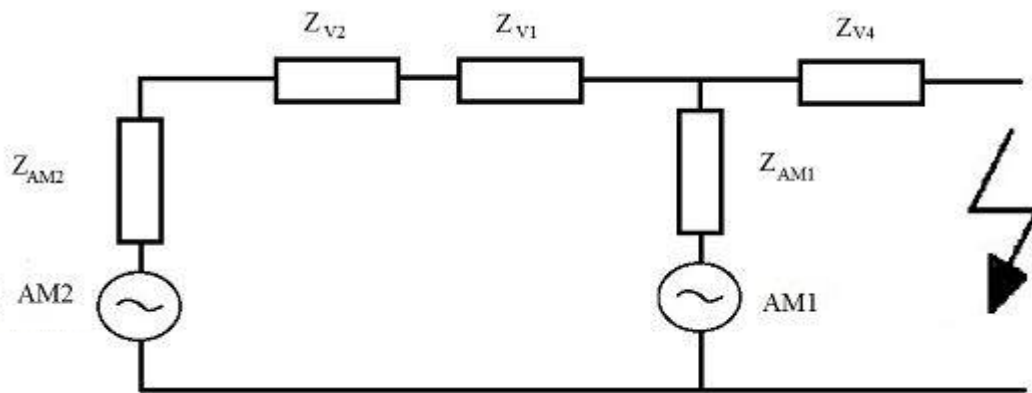
$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 5,278 \text{ kA}$$

$$I_{u2} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 7,915 \text{ kA}$$

$$I_{t2} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 6,245 \text{ kA}$$

## Prekidač i rastavljač 7

1) Odspoji se vod V3



$$Z_1 = Z_{AM2} + Z_{V1} + Z_{V2} = j59,121 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 Z_{AM1}}{Z_1 + Z_{AM1}} = j0,874 \Omega$$

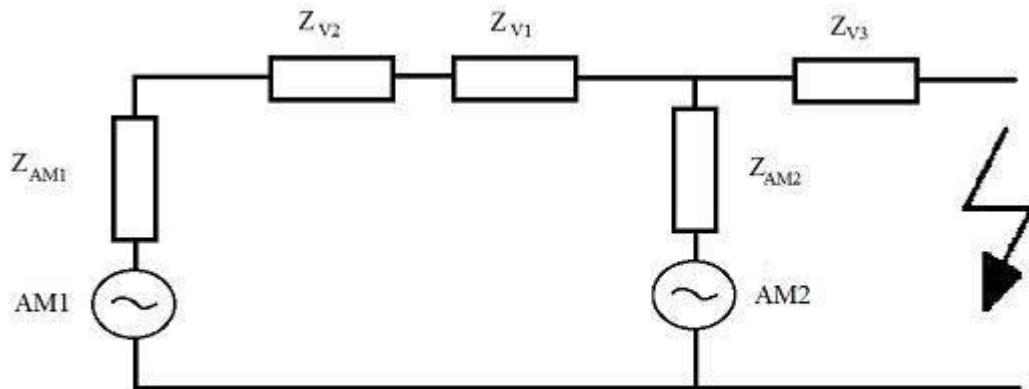
$$Z_{uk} = Z_2 + Z_{V4} = j13,234 \Omega$$

$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 5,278 \text{ kA}$$

$$I_{u1} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 7,915 \text{ kA}$$

$$I_{t1} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 6,245 \text{ kA}$$

2) Odspoji se vod V4 na drugom kraju





$$Z_1 = Z_{AM1} + Z_{V1} + Z_{V2} = j58,6773 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 Z_{AM2}}{Z_1 + Z_{AM2}} = j1,3015 \Omega$$

$$Z_{uk} = Z_2 + Z_{V3} = j47,6115 \Omega$$

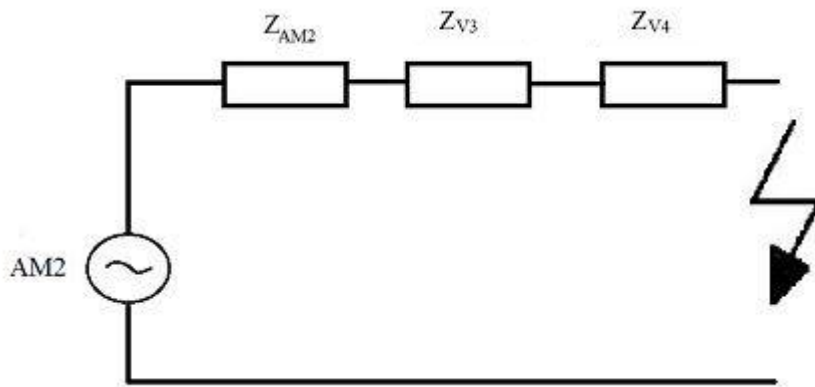
$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 1,467 \text{ kA}$$

$$I_{u2} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 2,116 \text{ kA}$$

$$I_{t2} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 1,736 \text{ kA}$$

Prekidač i rastavljač 8

1) Odspoji se vod V1 ili V2



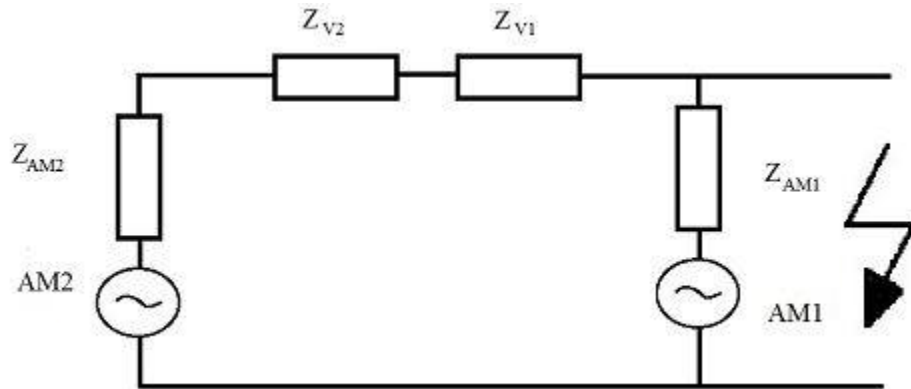
$$Z_{uk} = Z_{AM2} + Z_{V3} + Z_{V4} = j60,001 \Omega$$

$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 1,164 \text{ kA}$$

$$I_{u1} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 1,679 \text{ kA}$$

$$I_{t1} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 1,377 \text{ kA}$$

2) Odspoji se vod V4 na drugom kraju



$$Z_1 = Z_{AM2} + Z_{V2} + Z_{V1} = j59,121 \Omega$$

$$Z_{uk} = \frac{Z_1 Z_{AM1}}{Z_1 + Z_{AM1}} = j0,874 \Omega$$

$$I''_{K3} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{uk}} = 79,931 \text{ kA}$$

$$I_{u2} = k\sqrt{2}I''_{K3} = 115,25 \text{ kA}$$

$$I_{t2} = I''_{K3}\sqrt{m+n} = 94,576 \text{ kA}$$

Tablica 6.3. Izračunate vrijednosti struja kratkog spoja na sabirnicama i na vodovima

Prekidač/rastavljač	Udarana struja [kA]		Struja mjerodavna za ugrijavanje [kA]	
	KS na sabirnici	KS na vodu	KS na sabirnici	KS na vodu
1	<b>2,088</b>	<b>115,25</b>	1,398	94,532
2	<b>4,555</b>	<b>2,663</b>	3,736	2,184
3	<b>2,663</b>	<b>4,555</b>	2,184	3,737
4	<b>1,692</b>	<b>77,427</b>	1,388	63,51
5	<b>1,692</b>	<b>77,427</b>	1,388	63,51
6	<b>2,116</b>	<b>7,915</b>	1,736	6,245
7	<b>7,915</b>	<b>2,116</b>	6,245	1,736
8	1,679	1,377	<b>115,25</b>	<b>94,576</b>

*Tablica 6.4. Mjerodavne vrijednosti udarne struje i struje mjerodavne za ugrijavanje na temelju kojih se odabiru rastavljači*

Rastavljač	Udarna struja [kA]	Struja mjerodavna za ugrijavanje [kA]
1	115,25	94,532
2	4,555	3,737
3	4,555	3,737
4	77,428	63,51
5	77,427	63,51
6	7,915	6,245
7	7,915	6,245
8	115,25	94,576

Odabir rastavljača (prema tablicama 4.1 i 4.2) :

Rastavljači 1,4,5,8: Rastavljači nazivne struje 1000A, ali pojačana izvedba

Rastavljači 2,3,6,7: Rastavljači nazive struje 600A i nazivnog napona 110kV

*Tablica 6.5. Izračunate vrijednosti rasklopnih snaga prekidača*

Prekidač	Rasklopna snaga [MVA]
1	15200
2	600
3	600
4	10200
5	10200
6	1000
7	1000
8	15200

Odabir prekidača (prema tablici 3.1.):

Prekidač 1,4,5,8: Prekidači nazivne snage 15000 MVA, nazivnog napona 380 kV i nazivne struje 2000 A

Prekidači 2,3: Prekidači nazivne snage 750 MVA, nazivnog napona 30 kV i nazivne struje 1250 A

Prekidači 6,7: Prekidači nazivne snage 1500 MVA, nazivnog napona 60 kV i nazivne struje 1250 A

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu upozna se sa principom rada prekidača i rastavljača, vrstama prekidača i rastavljača kao i njihovom primjenom. Upozna se sa prekidnom snagom i strujama koje nastaju za vrijeme kratkog spoja, a to su udarna struja, prekidna struja te struja mjerodavna za ugrijavanje.

Glavni kriteriji za izbor prekidača su nazivni napon, nazivna struja te nazivna prekidna snaga. Kod odabira rastavljača, gledaju se vrijednosti nazivnog napona i nazivne struje, a onda na temelju tih podataka, odabire se rastavljač koji odgovara vrijednostima udarne struje kratkog spoja i struje mjerodavne za ugrijavanje. Na kraju se na jednom primjeru zamkaste mreže pokazalo kako se računaju te struje (udarna struja kratkog spoja i struja mjerodavna za umjeravanje) gdje se za svaki prekidač i rastavljač gledalo najnepovoljniji slučaj kratkog spoja. Svaki prekidač i rastavljač je imao dva moguća najnepovoljnija mjesta kratkog spoja. Izračunalo se vrijednosti struja kratkog spoja za oba slučaja, te ih se međusobno usporedilo, nakon čega smo uzeli veću vrijednost kao mjerodavnu. Na temelju tih vrijednosti su se odabrali rastavljači i prekidači za zadanu mrežu.

## **8. LITERATURA**

- [1] Požar, H.: „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, Tehnička knjiga, Zagreb 1973
- [2] Meštrović, K.: „Prekidanje struje“, Tehničko veleučilište u Zagrebu
- [3] Krajcar, S.: „Proračun struja kratkog spoja u izmjeničnim trofaznim krugovima“, FER
- [4] Živić Đurović, M.: „Kratki spoj“, predavanja, Tehnički fakultet Rijeka