

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

TEHNIKE PREKIDANJA STRUJE

Rijeka, svibanj 2016.

Igor Blagovčanin

0069046709

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

TEHNIKE PREKIDANJA STRUJE

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

Rijeka, svibanj 2016.

Igor Blagovčanin

0069046709

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-04/15-14/16
Rijeka, 06.03.2015.

ZADATAK

za završni rad

Pristupnik: Igor Blagovčanin

Matični broj: 0069046709
Lokalni matični broj: 09800007

Naziv zadatka: **TEHNIKE PREKIDANJA STRUJE**

Naziv zadatka na
engleskom jeziku: **CURRENT BREAKING TECHNIQUES**

Sadržaj zadatka:

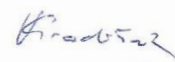
Prekidanje istosmjerne i izmjenične struje. Prekidanje struje u različitim medijima za gašenje električnog luka (zrak, stlačeni zrak, ulje, plin SF₆, vakuum). Izbor prekidača. Sklapanje kondenzatorskih baterija i induktivnih trošila.

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

IZJAVA

Sukladno s člankom 9. *Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija* Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od lipnja 2011., izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku br. 602-04/15-14/16 od 17.03.2015.

Rijeka, svibanj 2016.



Igor Blagovčanin

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	2
2. PREKIDANJE STRUJE.....	3
2.1 Osnovne definicije.....	3
3. PREKIDANJE IZMJENIČNE STRUJE.....	7
3.1. Prekidanje struje kratkog spoja.....	10
3.2. Prekidanje struje u trofaznoj mreži.....	14
3.3. Sabirnički kratki spoj (na stezaljkama prekidača).....	16
3.4. Bliski kratki spoj.....	17
4. PREKIDANJE ISTOSMJERNE STRUJE.....	18
4.1. Sustavi za prekidanje istosmjerne struje.....	19
5. TEHNIKE PREKIDANJA STRUJE U RAZLIČITIM MEDIJIMA.....	22
5.1. Prekidanje struje u zraku.....	22
5.2. Prekidanje struje u ulju.....	25
5.3. Prekidanje struje u stlačenom zraku.....	29
5.4. Prekidanje struje u sumpornom heksafluoridu (plin SF ₆).....	31
5.5. Prekidanje struje u vakuumu.....	33
6. SINKRONO PREKIDANJE STRUJE.....	35
6.1. Sklapanje kondenzatorskih baterija.....	36
6.1.1. Uklapanje kondenzatorskih baterija.....	36
6.1.2. Isklapanje kondenzatorskih baterija.....	36
6.2. Sklapanje induktivnih trošila.....	36
6.2.1. Uklapanje induktivnih trošila.....	36
6.2.2. Isklapanje induktivnih trošila.....	37
7. IZBOR PREKIDAČA.....	37
8. PRIMJER PRORAČUNA STRUJA KRATKOG SPOJA.....	39
9. ZAKLJUČAK.....	46
10. LITERATURA.....	47

1. UVOD

U nastavku ovog rada uglavnom će se govoriti o prekidačima i metodama prekidanja struja u izmjeničnim te istosmjernim mrežama.

Prekidači imaju dva stabilna stanja, „*otvoreno*“ i „*zatvoreno*“. Dok otvoreno stanje predstavlja beskonačno veliku, a zatvoreno zanemarivo malu impedanciju, prekidači moraju biti sposobni u svakom trenutku prelaziti iz jednog stabilnog stanja u drugo a da pri tome ne izazivaju velike smetnje u krugu. Skoro svi prekidači koji se u današnje vrijeme koriste su mehanički prekidači, što znači da struju prekidaju mehaničkim odvajanjem kontakata. Pri odvajanju kontakata dolazi do pojave električnog luka kojeg je potrebno ugasiti te osigurati od ponovnog paljenja. Gašenje luka u izmjeničnoj mreži je drugačije nego u istosmjernoj, a solucije za oba slučaja opisane su u ovom radu. Zanimljivo je da u slučaju izmjenične struje upravo električni luk sprječava trenutni pad struje te osigurava njen prirodni sinusoidalni put do nule.

Mnogo toga se promijenilo od prvih prekidača do današnjih, tehnologija brzo napreduje a napredak prekidača se vidi u sve manjim dimenzijama i sve boljim karakteristikama. Prekidači imaju vrlo važnu ulogu u elektroenergetici jer ne samo da omogućuju isklapanje i uklapanje dijelova mreže po potrebi već štite mrežu od struja kratkih spojeva koje nastaju uslijed kvarova. Nakon što sigurnosni releji detektiraju kvar predaju naredbu prekidaču da odvoji dio mreže koji je u kvaru, kako ne bi došlo do većih oštećenja elemenata mreže.

U radu su istaknute neke od izvedbi prekidača te opisani najkorišteniji mediji za gašenje električnog luka. Osim zraka, kao najdostupnijeg i najekonomičnijeg medija, spomenuti su i ulje, stlačeni zrak, vakuum te sumporni heksafluorid (plin SF₆).

U završnom dijelu rada opisano je sklapanje kondenzatorskih baterija te sklapanje induktivnih trošila. Opisane su i glavne karakteristike prekidača, nazivni napon, struja te prekidna moć.

2. PREKIDANJE STRUJE

Prekidači imaju dva stabilna stanja, „otvoreno“ i „zatvoreno“. Otvoreno stanje znači da prekidač ima beskonačno veliku impedanciju, dok zatvoreno stanje predstavlja spoj sa zanemarivo malom impedancijom. Također važna karakteristika prekidača je mogućnost prelaska iz jednog stanja u drugo bez izazivanja velikih prenapona u elektroenergetskom sustavu.

Većinu prekidača koji su danas u upotrebi svrstavamo u skupinu mehaničkih sklopnih aparata, kod kojih do prekidanja struje dolazi mehaničkim razdvajanjem kontakata. Pri takvom razdvajanju uvijek dolazi do pojave električnog luka, odnosno električnog proboja kroz plin. Rezultat je oslobađanje velike količine topline koja uzrokuje nastajanje plazme i vodljivosti u plinu koji je inače izolator. Količina oslobođene topline je toliko velika da katkad uzrokuje nagaranje i zavarivanje kontakata te oštećenja izolacije ili drugih komponenti.

Električni luk je potrebno i ugasiti, a metode gašenja luka kod istosmjerne i izmjenične struje se veoma razlikuju. U izmjeničnom strujnom krugu električni luk sprječava trenutno prekidanje struje, koje bi izazvalo velike prenapone u krugu, te dopušta struji da se po sinusoidi spusti u nulu. Nakon gašenja luka potrebno je osigurati da ne dođe do ponovnog paljenja. Dok za izmjenični strujni krug možemo reći da je električni luk korisna pojava, u istosmjernom krugu struja nikada sama ne pada u nulu. Kako bi se ugasio luk potrebno je konstantno povećanje otpora luka dok se struja ne spusti na iznos koji nije dovoljan za održavanje stabilnog luka. Izbor sklopnog aparata s prikladnom konstrukcijom vrlo je važan zbog velikih mehaničkih i toplinskih napreznja za vrijeme gorenja luka kako bi se energija luka moglo svesti na najmanju moguću mjeru u što kraćem vremenskom periodu. Ovisno o vrsti aparata, kod prekidanja istosmjerne struje, potrebno je u električnom luku poništiti 20% - 60% veću energiju nego kod prekidanja izmjenične struje.

2.1 Osnovne definicije

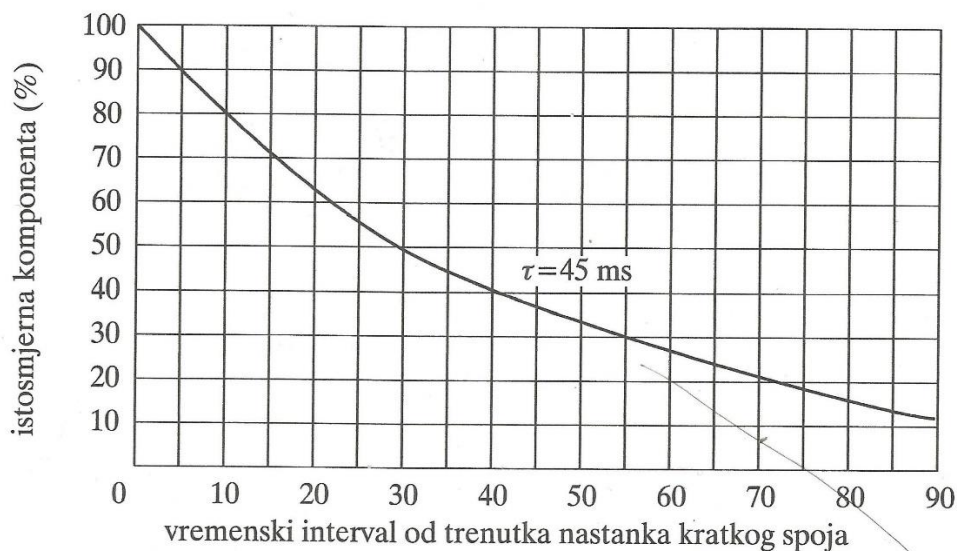
Osnovna karakteristika prekidača je njegova prekidna moć, odnosno najveća vrijednost prekidne struje koju može isklopiti, a izražava se u kiloamperima (kA).

Prekidna struja se javlja u trenutku razdvajanja kontakata a prema definiciji je efektivna vrijednost simetrične komponente struje.

$$I_p = \frac{I_{sm}}{\sqrt{2}} \quad (2.1)$$

Prekidač mora moći iskllopiti struju kratkog spoja uz uvjete:

- da je prekidna moć prekidača veća od simetrične komponente struje
- da je istosmjerna komponenta manja od vrijednosti koja se određuje pomoću sljedeće slike (Slika 2.1.)



Slika 2.1. Određivanje istosmjerne komponente struje prema IEC-standardu

Vremensku konstantu određuje vrijednost instalirane snage elektrane i udaljenost postrojenja od elektrane. Pa primjerice za postrojenja koja se nalaze blizu elektrane s velikom instaliranom snagom vremenska konstanta je $\tau \approx 100$ ms, za postrojenja blizu elektrane s prosječnom instaliranom snagom $\tau \approx 45$ ms, a za udaljen postrojenja $\tau \approx 25$ ms.

Prekidna snaga računa se množenjem iznosa prekidne struje i linijskog povratnog napona (2.2.) a izražava se u megavoltamperima (MVA):

$$S_p = k I_p U_A \quad (2.2.)$$

Gdje je:

S_p prekidna snaga [MVA]

K konstanta koja za jednofazni sustav iznosi 1, a za trofazni sustav $\sqrt{3}$.

I_p prekidna struja [kA]

U_A linijski povratni napon [kV]

Prekidna snaga je najvažniji čimbenik kod izbora prekidača. Odgovarajući prekidač biramo tako da izračunamo struju kratkog spoja (prekidnu snagu) na mjestu poželjnom za ugradnju prekidača. Prekidači koji su namijenjeni za određeni nazivni napon (U_{n1}) mogu se koristiti i za niže nazivne napone (U_{n2}), ali s manjom prekidnom snagom (S_{p2}) (2.3.).

$$S_{p2} = S_{p1} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} \quad (2.3.)$$

Ako je u pitanju viši nazivni napon prekidač se ne smije koristiti, neovisno o prekidnoj struji.

Odmah nakon gašenja električnog luka na stezaljkama sklopnog aparata pojavljuje se povratni napon (PN). U intervalu od nekoliko milisekundi nakon gašenja, s izrazito prijelaznim karakterom, javlja se prijelazni povratni napon (PPN). Dok se u intervalu od nekoliko mikrosekundi javlja i početni prijelazni povratni napon (PPPN).

Brzina porasta povratnog napona definirana je kao omjer prve amplitude povratnog napona i vremena potrebnog za dostizanje te amplitude. Brzina porasta naziva se još i strmina.

$$S_A = \frac{du_A}{dt} = tg\alpha \approx \frac{U_m}{t_m} \quad (2.4.)$$

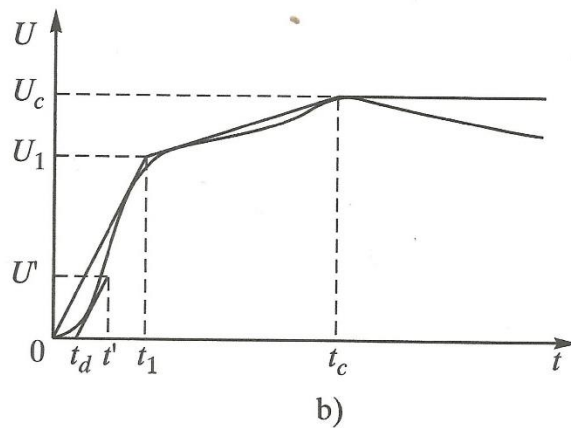
Gdje je:

- U_m maksimalna vrijednost povratnog napona [V]
- t_m vrijeme od trenutka gašenja luka do pojave napona U_m [s]
- u_A linijski povratni napon [kV]

Faktor amplitude povratnog napona definiran je kao omjer maksimalne vrijednosti povratnog napona i tjemene vrijednosti napona mreže:

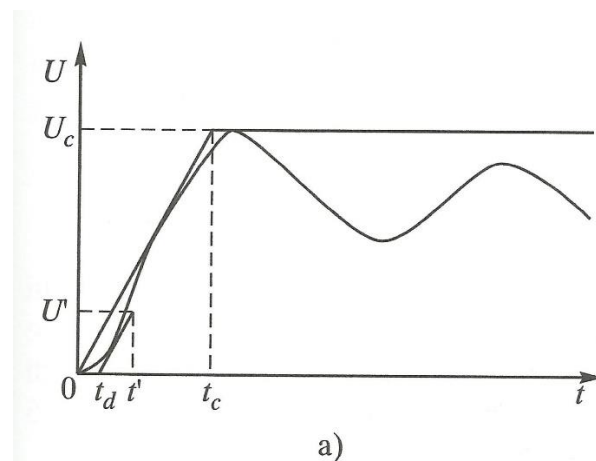
$$K = \frac{U_m}{E_m} \quad (2.5.)$$

Oblik karakteristike povratnog napona ovisi o strujnom krugu. Na primjer u sustavima s nazivnim naponom većim od 100 kV karakteristika povratnog napona ima veliku početnu strminu porasta, a kasnije malu. Ispitni povratni napon se u ovom slučaju definira sa četvero-parametarskom krivuljom, (Slika 2.2.). U slučajevima kada je nazivni napon manji od 100 kV ispitni povratni napon je definiran dvo-parametarskom krivuljom, (Slika 2.3.).



t_c vrijeme potrebno da se postigne U_c
 t_d vrijeme kašnjenja

Slika 2.2. Prikaz ispitnog povratnog napona četveroparametarskom krivuljom



U_1 prvi referentni napon
 t_1 vrijeme potrebno da se postigne U_1
 U_c vršna vrijednost PPN-a

Slika 2.3. Prikaz ispitnog povratnog napona dvoparametarskom krivuljom

Pri isklopu u trofaznom strujnom krugu nije moguće ugasiti električni luk u sve tri faze istovremeno. Pojedinačno prekidanje struje dovodi do većeg napreznja na polu prekidača koji prekida prvi. Zbog tog napreznja u obzir moramo uzeti faktor prvog pola, koji kod prekidača s nazivnim naponom većim od 245 kV iznosi 1,3, a kod prekidača s nazivnim naponom manjim od 245 kV iznosi 1,5.

Faktor snage svakog pola odgovara kosinusu faznog pomaka između struje i napona u trenutku odvajanja kontakata, a definiran je izrazom (2.6.).

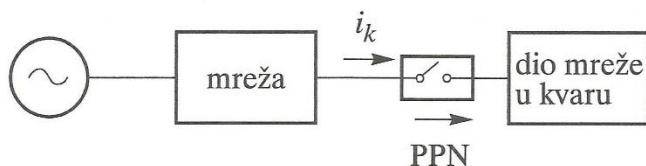
$$\cos \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) \quad (2.6.)$$

Gdje je:

- X reaktancija strujnog kruga [W]
- R djelatni otpor strujnog kruga [Ω]

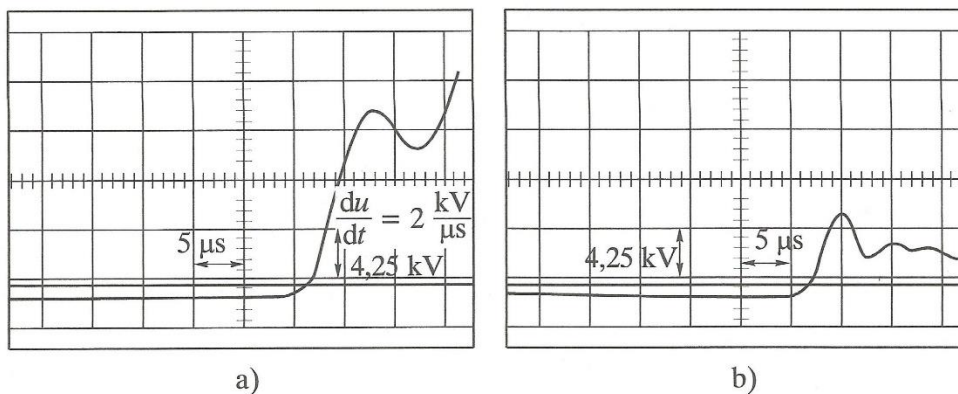
3. PREKIDANJE IZMJENIČNE STRUJE

U slučaju kvara na mreži sustav zaštite otvara prekidač. Odvajanje dijela mreže koji je u kvaru jedna je od osnovnih zadaća visokonaponskih prekidača. U idealnim uvjetima prekidač prekida u nul-točki struje te dolazi do pojave prijelaznog povratnog napona na kontaktima prekidača. Prijelazni povratni napon koji se pojavi nakon prekidanja struje može biti previsok pa prekidač ne uspijeva prekinuti struju te se javlja električni luk.



Slika 3.1. Odvajanje dijela mreže u kvaru prekidačem

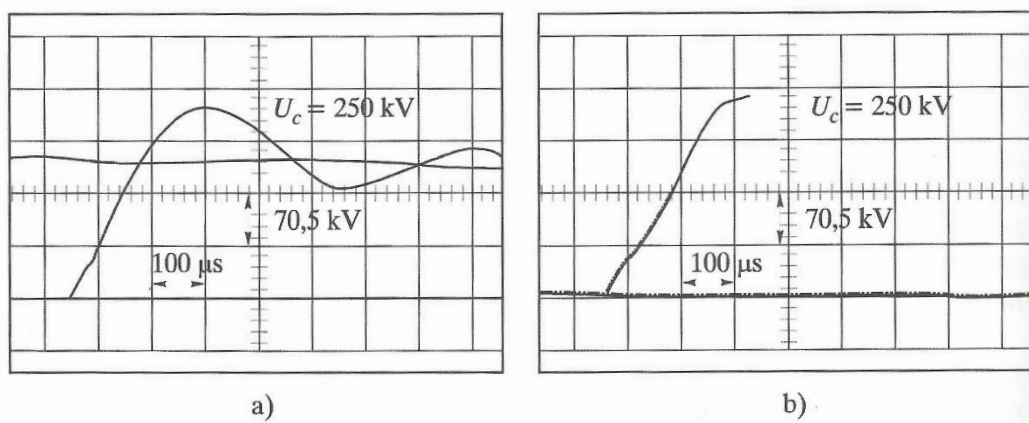
U današnje vrijeme razlikujemo dvije vrste kvarova na visokonaponskim prekidačima, a uzrokuju ih termički i dielektrični proboj. Režim termičkog poboja se javlja ako je strmina prijelaznog povratnog napona, nakon nultočke struje, veća od neke kritične vrijednosti. Tada, luk koji je skoro nestao, se ponovo javlja zbog Jouleovih gubitaka. S porastom temperature na prekidaču rastu i Jouleovi gubici a s time i električna provodnost dielektričnog materijala.



Slika 3.2. Oscilogrami SF₆ prekidača pri struji 72 kA. a) uspješno prekidanje struje;
b) termički proboj

Gornji oscilogrami prikazuju uspješan prekid struje (Slika 3.2. a) i slučaj termičkog proboja (Slika 3.2. b) kod SF₆ prekidača, pri struji od 72 kA. U slučaju termičkog proboja, oko 2 ms nakon nultočke struje, napon više ne prati krivulju prijelaznog povratnog napona te se mijenja prema naponu luka kroz period od nekoliko mikrosekundi.

Nakon ispravnog termičkog prekidanja, tjemena vrijednost prijelaznog povratnog napona može doseći vrlo visoku razinu, koja tada vodi do dielektričnog proboja među kontaktima prekidača.



Slika 3.3. Oscilogrami SF₆ prekidača pri struji 50 kA a) uspješno prekidanje struje;
b) dielektrični proboj

I u ovom slučaju (slika 3.3.) lijevi oscilogram prikazuje uspješno prekidanje struje, dok desni prikazuje slučaj dielektričnog proboja blizu tjemene vrijednosti napona. Značajka ovakvog kvara je veoma brzi slom napona koji je nemoguće prikazati na oscilogramu.

Iz prakse je poznato da je za režim dielektričnog proboja najgori kvar na stezaljkama prekidača. Dok je za režim termičkog proboja kritičan kvar na vodu, na nekoj određenoj udaljenosti od prekidača. Na kratkim vodovima, od svega nekoliko kilometara, javljaju se najveća naprezanja pa ovaj kvar još zovemo i *bliski kratki spoj* ili rjeđe *kilometrički kvar*.

Na povratni napon može utjecati i električni luk koji je nastao u prekidaču, pa se u vidu jedinstvenog opisa mreže uvodi pojam idealnog prekidača. Idealni prekidač prekida struju bez napona luka, a povratni napon koji nastane kod ovakvog prekidača zovemo *prirodni prijelazni povratni napon*. U teoriji, idealni prekidač u trenutku prekida struje momentalno mijenja vrijednost otpora sa nule na beskonačnu vrijednost, dok se probojni napon među kontaktima mijenja od $u_d=0$ na $u_d=U_d$

Kako bi odredili povratni prijelazni napon prvo moramo :

- odrediti struje kratkog spoja (struje koje prekidač mora prekinuti)
- odabrati model za transformiranje mreže (u obzir uzeti parametre, topologiju mreže, uvjete prekidanja i kvara)
- izračunati prijelazni povratni napon pomoću metode superpozicije.

Kada se određuje struja prekidača, u vremenu isklapanja kvara (blizu generatora), u obzir treba uzeti istosmjerne i izmjenične komponente struje kratkog spoja.

Problem kod određivanja prijelaznog povratnog napona je određivanje vrijednosti elemenata mreže (U_g , L , R i C). To možemo izvest transformiranjem mreže u dijelovima. Tjemenu vrijednost prijelaznog povratnog napona možemo izračunati pomoću izraza:

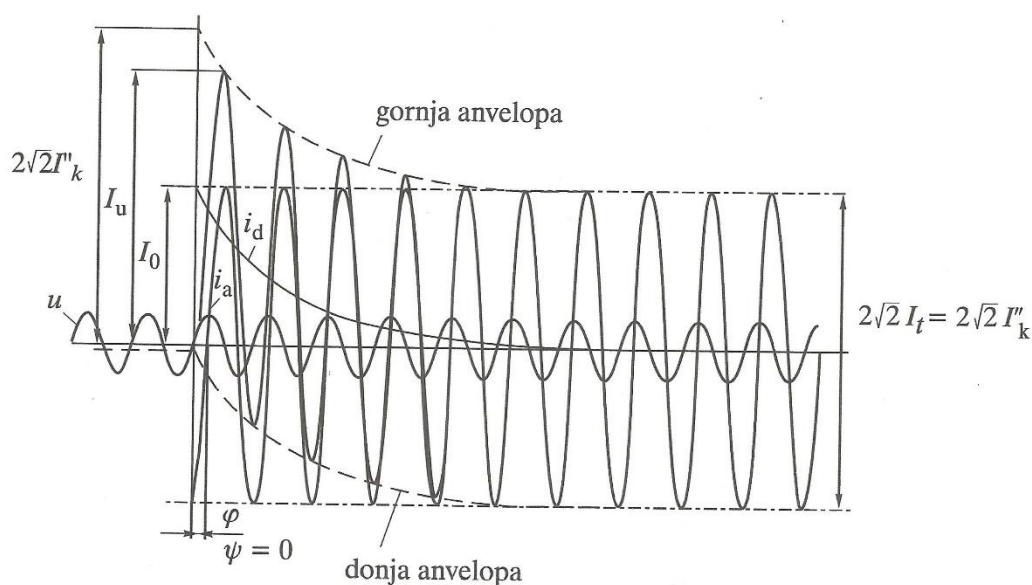
$$U_m = K_I \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_n \quad (3.1.)$$

Gdje je:

K_I faktor prvog pola ili fazni faktor. Vrijednost mu može biti 0,5 – 1,5 (ovisno o parametrima i konfiguraciji mreže, uvjetima kvara)

3.1. Prekidanje struje kratkog spoja

U elektroenergetskim sustavima kratki spoj nastaje zbog dodirivanja faznih vodiča (sa zemljom i/ili međusobno). Za vrijeme kratkog spoja javljaju se vrlo velike struje koje mogu prouzročiti daljnje probleme, kao na primjer veća elektromagnetska naprezanja, zagrijavanje vodiča ili kvarove na prekidačima (ako je na mjestu kvara prekidna snaga veća od nazivne). Kod izrade sklopnih aparata najveća struja nastaje u slučaju trofaznog kratkog spoja. Ovisno o toj struji računa se prekidna snaga. Udaljenost kvara od generatora određuje iznos struje kratkog spoja, a oblik ovisi o trenutku nastanka kratkog spoja. Oblik još ovisi i o magnetskom toku obuhvaćenom statorskim namotom, ako je on maksimalan struja kratkog spoja ima i izmjeničnu i istosmjernu komponentu te se naziva asimetrična struja kratkog spoja. Prikaz takve struje dan je na slici (Slika 3.4.).



Slika 3.4. Asimetrična struja kratkog spoja

Ako je magnetski tok obuhvaćen statorskim namotom jednak nuli, dobivamo simetričnu struju kratkog spoja, budući da ima samo izmjeničnu komponentu struje.

Izrazom (3.2.) dana je ovisnost struje kratkog spoja o vremenu, (za induktivni strujni krug), [2]:

$$i_K(t) = i_a(t) + i_d(t) \quad (3.2.)$$

Gdje je:

i_a izmjenična komponenta struje kratkog spoja (kA)

i_d istosmjerna komponenta struje kratkog spoja (kA)

Gornji izraz (3.2.) je previše složen za računanje prekida struje u prekidačima, potrebno je prilagoditi ga:

$$i_K(t) = \sqrt{2} \left[(I_K'' - I_K') e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_K' - I_K) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_K \right] \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \sqrt{2} I_K'' \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R\omega t}{X_d'' + X_n}} \quad (3.3.)$$

Gdje je:

$i_d = \sqrt{2} I_K'' \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R\omega t}{X_d'' + X_n}}$ istosmjerna komponenta struje k.s. (kA)

$\sqrt{2} (I_K'' - I_K') e^{-\frac{t}{\tau_d''}}$ početna komponenta struje k.s. (kA)

$\sqrt{2} (I_K' - I_K) e^{-\frac{t}{\tau_d'}}$ prijelazna komponenta struje k.s. (kA)

$\sqrt{2} I_K$ stacionarna komponenta struje k.s. (kA)

X_d'', X_d', X_d početna, prijelazna, stacionarna reaktancija sinkronog generatora (Ω)

$\tau_d'', \tau_d', \tau_d$ početna, prijelazna, stacionarna vremenska konstanta kruga (s)

$$\tau = \frac{X_K}{(\omega R_K)}$$

vremenska konstanta kruga (s)

$$I''_K = \frac{U}{Z_K}$$

efektivna vrijednost početne simetrične struje

k.s. (kA)

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$$

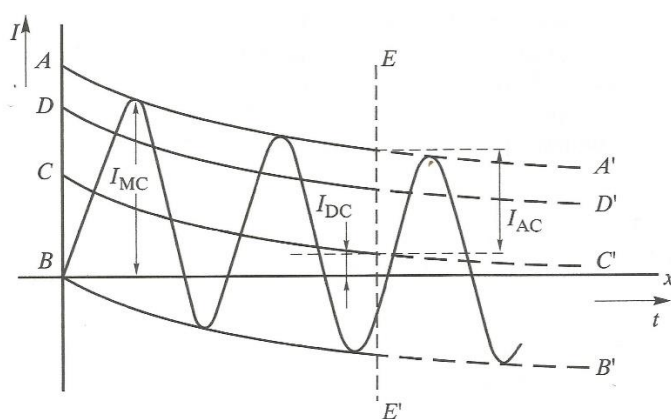
impedancija kratkog spoja (Ω)

Ψ

el. kut napona u trenutku nastanka k.s. (rad)

Početna komponenta struje kratkog spoja traje vrlo kratko pa se u trenutku otvaranja prekidača, to jest paljenja električnog luka, može zanemariti. Nakon toga, za vrijeme gorenja luka, prijelazna komponenta struje kratkog spoja se relativno malo mijenja zbog pripadajuće velike vremenske konstante, te ju u tom periodu smatramo periodičkom funkcijom iste amplitude. Isto tako se smanji i istosmjerna komponenta struje kratkog spoja te ju u tom periodu možemo svesti na funkciju prijelazne komponente struje kratkog spoja.

Metoda određivanja prekidne struje prema IEC-standardima prikazana je na idućoj slici (Slika 3.5.), [3]:



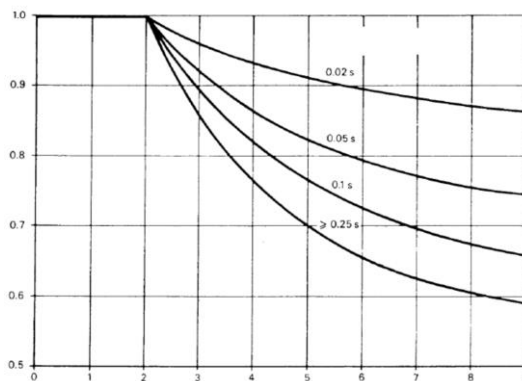
AA' anvelopa strujnog vala
 BB' anvelopa strujnog vala
 Bx nulta linija
 CC' pomak nulte linije strujnog vala u bilo kojem trenutku
 DD' efektivna vrijednost izmjenične komponente struje
 EE' trenutak razdvajanja kontakata (trenutak paljenja električnog luka)

I_{MC} uklopna struja
 I_{AC} vršna vrijednost izmjenične komponente struje u trenutku EE'
 $\frac{I_{AC}}{\sqrt{2}}$ efektivna vrijednost izmjenične komponente struje u trenutku EE'
 I_{DC} istosmjerna komponenta struje u trenutku EE'
 $I_{DC} \times \frac{100}{I_{AC}}$ postotak istosmjerne komponente

Slika 3.5. Određivanje prekidne i uklopne struje kratkog spoja, postotka istosmjerne komponente

Prekidna struja može se dobiti pomoću izraza 3.4. ako nam je poznata struja kratkog spoja:

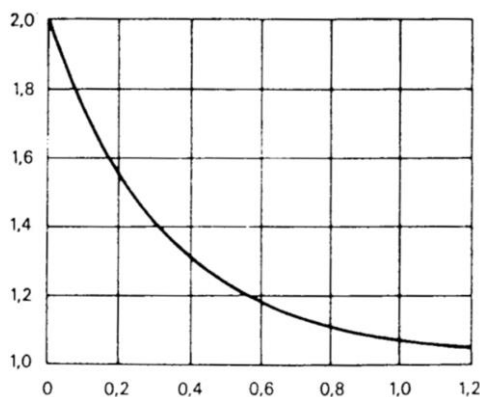
$$I_p = \mu I_K'' \quad (3.4.)$$



Slika 3.6. Prikaz prekidne struje - μ / (I_K''/I_G)

Poznavajući struju kratkog spoja možemo dobiti i udarnu struju (3.5.):

$$I_u = \kappa \sqrt{2} I_K'' \quad (3.5.)$$



Slika 3.7. Prikaz udarne struje - κ / (R/X)

Početna snaga kratkog spoja također se može dobiti pomoću struje kratkog spoja (3.6.)

$$S_K'' = \sqrt{3} U_n I_K'' \quad (3.6)$$

Prekidna snaga računa se uz pomoć izraza (3.7.):

$$S_p = \sqrt{3} U_n I_p \quad (3.7.)$$

3.2. Prekidanje struje u trofaznoj mreži

Kao što je već navedeno, u slučaju isklapanja struje u trofaznom sustavu nije moguće prekinuti struju u sve tri faze istovremeno. Struje u pojedinim fazama su međusobno pomaknute za $2\pi/3$ pa ne prolaze kroz nulu istovremeno.

Ako se električni luk prvo prekine u fazi gdje struja prva dolazi u nulu, trofazni sustav se svodi na dvofazni sustav sa strujama koje su međusobno pomaknute za π . Te dvije struje su iznosom jednake, a nakon 5 ms ($\pi/2$) dolaze u nulu u istom trenutku te se prekidaju.

Na polu koji prvi prekida struju pojavljuje se povratni napon iznosa $1,5 E$, a izračunati se može pomoću izraza (3.8), [4].

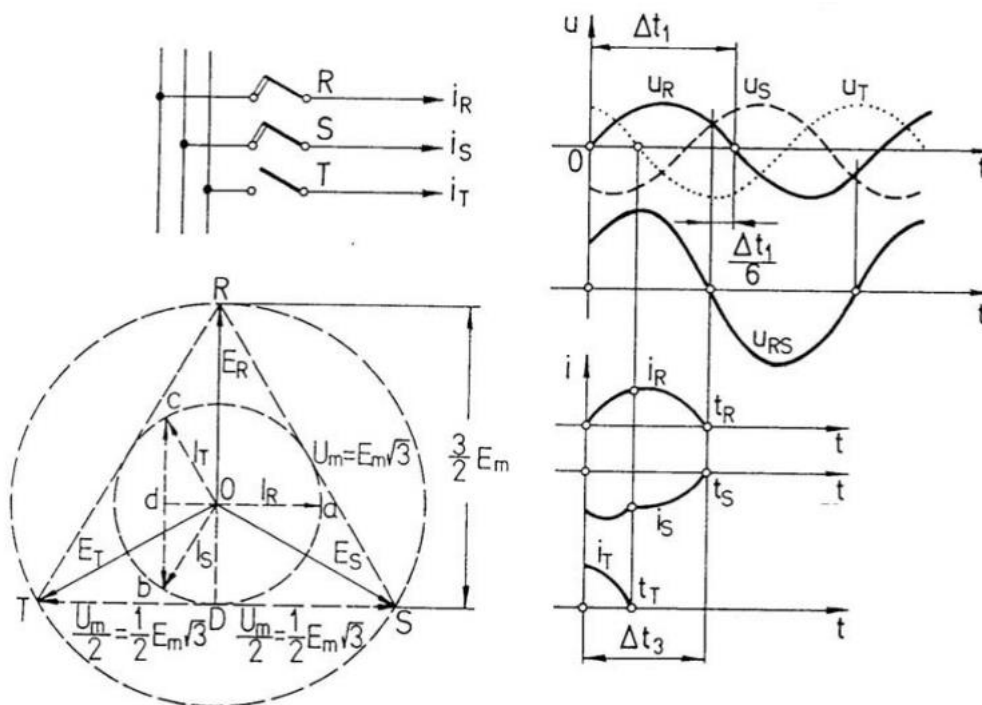
$$U_{AT} = E \frac{3Z_0}{2Z_0 + Z_d} \quad (3.8.)$$

Dok povratni napon na drugom polu možemo dobiti pomoću (3.9.), [4]:

$$U_{AR} = U_{AS} = \sqrt{3}E \frac{\sqrt{Z_d^2 + Z_d Z_0 + Z_0^2}}{2Z_d + Z_0} \quad (3.9.)$$

Gdje je:

- Z_d direktna impedancija
- Z_0 nulta impedancija



Slika 3.8. Prekidanje trofazne struje

U mrežama s direktno uzemljenom nultočkom za trolni kratki spoj s istovremenim spojem sa zemljom vrijedi izraz $Z_d = Z_0$. Prema (3.8.) na polu koji prvi prekida struju vrijednost povratnog napona je jednaka E. Odnosno prema (3.9.) povratni napon na drugom polu također iznosi E.

U slučaju trolnog kratkog spoja bez spoja sa zemljom (ili mreže s izoliranom nultočkom), nulta impedancija je mnogo veća od direktne ($Z_0 \gg Z_d$). Na polu koji prvi prekida struju, prema (3.8.), povratni napon je jednak 1,5 E. Struja u preostalim fazama se prekida istovremeno, a povratni napon polova iznosi 0,866 E.

Ako je u kratki spoj uključena zemlja povratni napon pola koji zadnji prekida struju (ako ne prekida istovremeno s drugim) iznosi E, budući da je to jedini napon izvora u krugu. Vidljivo je da se najveći povratni napon pojavljuje na polu koji prvi prekida struju, a povećano naprezanje koje nastaje zbog toga se uzima u obzir sa faktorom prvog pola K_I . Ovisno o vrsti kratkog spoja faktor prvog pola računamo na sljedeće načine [5]:

Z_d, Z_i, Z_0 – direktna, inverzna i nulta impedancija strane izvora

Z'_d, Z'_i, Z'_0 – direktna, inverzna i nulta impedancija strane voda

Trolni kratki spoj bez spoja sa zemljom (u ispitnoj stanici) – direktna impedancija od strane tereta $Z'_d = 0$, a nulta impedancija Z'_0 je beskonačna.

$$K_I = \frac{U_{AI}}{Z_d I''_{K3}} = \frac{3}{2} \quad (3.10.)$$

Gdje je:

U_{AI} povratni napon na polu koji prvi prekida struju

Z_d direktna impedancija strane izvora

I_{K3} struja trolnog kratkog spoja

Trolni kratki spoj bez spoja sa zemljom (u realnoj mreži) – $Z'_d = 0$, dok je Z'_0 jednaka impedanciji voda iza mjesta kvara.

$$K_I = \frac{U_{AI}}{Z_d I''_{K3}} = \frac{3}{2} \frac{Z_0 + Z'_0}{(Z_0 + Z'_0) + Z_d} \quad (3.11.)$$

Gdje je:

Z'_0 nulta impedancija strane voda

Tropolni kratki spoj spojen sa zemljom – $Z'_0 = Z'_d = 0$

$$K_I = \frac{U_{AI}}{Z_d I''_{K3}} = \frac{3Z_0}{2Z_0 + Z_d} \quad (3.12.)$$

Jednopolni kratki spoj sa zemljom (treći pol koji prekida struju) - $Z'_0 = Z'_d = 0$

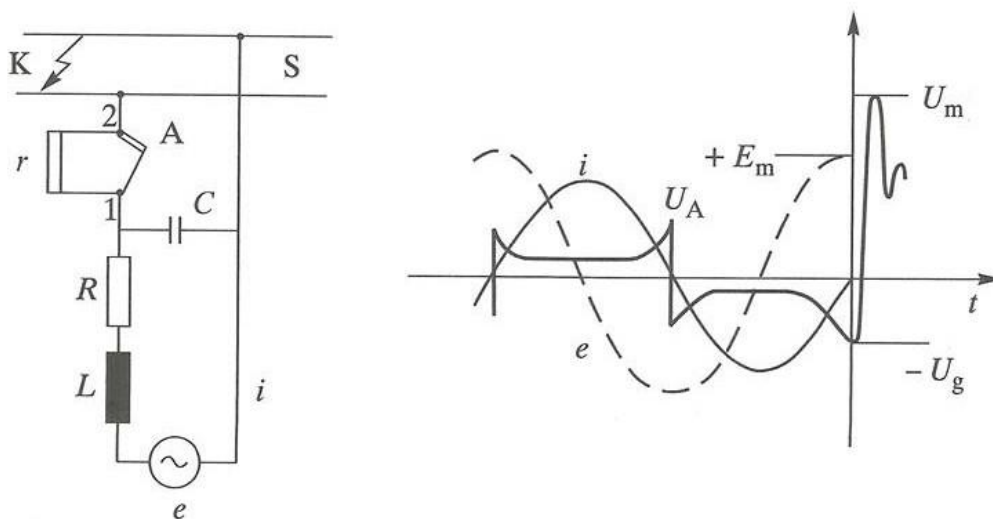
$$K_I = \frac{U_{AIII}}{Z_d I''_{K1}} = \frac{Z_0 + 2Z_d}{3Z_d} \quad (3.13.)$$

Gdje je:

I''_{K1} početna struja jednopolnog kratkog spoja

3.3. Sabirnički kratki spoj (na stezaljkama prekidača)

Sabirnički kratki spoj nastaje u neposrednoj blizini sinkronog generatora ili prekidača. Zbog male udaljenosti između kvara i sinkronog generatora, mala je i impedancija u krugu što stvara vrlo veliku struju kratkog spoja. Zbog vrlo velike struje ali i pojave velike amplitude povratnog napona, sabirnički kratki spoj je jedan od najtežih stanja za prekidač.



e	električna sila izvora	K	kratki spoj
R, L, C	parametri izvora	U_A	napon na aparatu
A	prekidač	U_g	napon gašenja luka
S	sabirnice	i	struja kratkog spoja

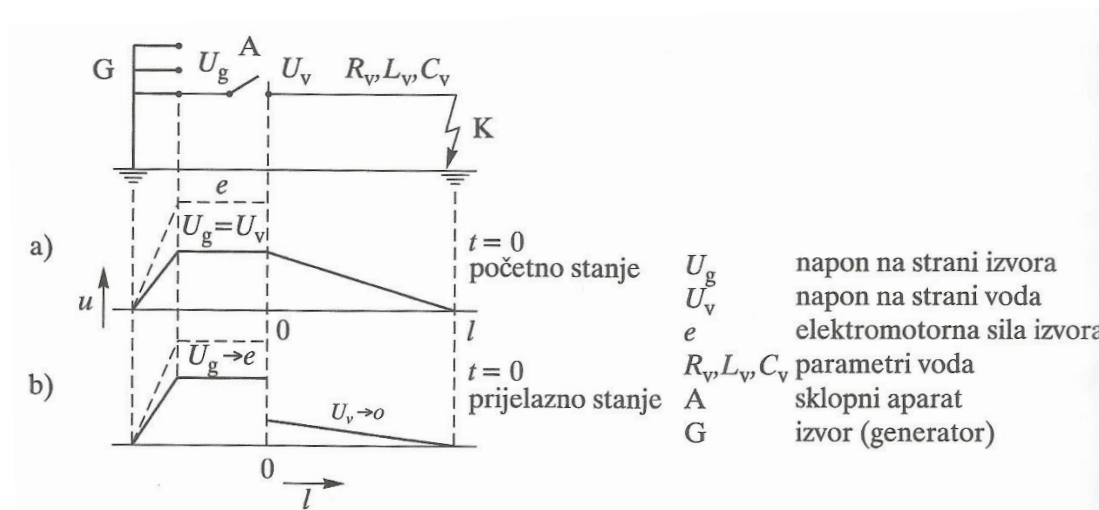
Slika 3.9. Sabirnički kratki spoj

Slika 3.9. prikazuje nadomjesnu shemu elektroenergetskog postrojenja sa sabirnicama, sinkronim generatorom i prekidačem. R, L i C parametrima nadomješteni su generatorski namoti i vodiči do prekidača. Paralelni otpor koji ograničava povratni napon označen je sa r, [6].

Ako na sabirnicama dođe do kratkog spoja uključuje se nadstrujna zaštita i prekidač dobiva signal za isklon te automatski otvara kontakte što vodi do paljenja električnog luka.

3.4. Bliski kratki spoj

Bliski kratki spoj podrazumijeva da je kratki spoj nastao na udaljenosti od nekoliko kilometara od prekidača. Iznos struje kratkog spoja je manji nego kod sabirničkog kratkog spoja ali zbog velike strmine povratnog napona može se dogoditi da ne uspije prekinuti struju.



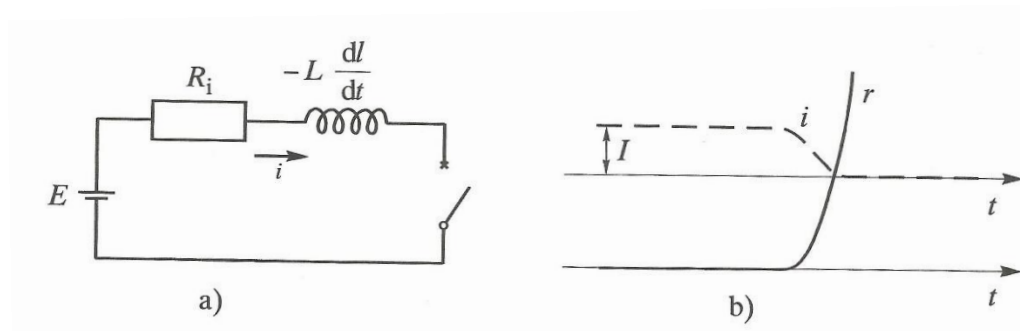
Slika 2.11. Bliski kratki spoj

Na slici 2.11. vidljivo je da je s lijeve strane prekidača napon jednak nazivnom naponu generatora, a na prekidaču je jednak umnošku reaktancije voda (od prekidača do mjesta k.s.) i struje kratkog spoja ($I_k X$). Na karakteristici pod a) prikaz je faznog napona nedugo prije otvaranja prekidača, dok je pod b) prikazan fazni napon neposredno nakon otvaranja.

4. PREKIDANJE ISTOSMJERNE STRUJE

Na slici 4.1.a) prikazan je jednostavan strujni krug koji ćemo koristiti kao primjer. Ponašanje struje i otpora u trenutku prekida prikazano je na slici 4.1.b). Zanimljivo li kapacitet, Kirchhoffov zakon za napone postaje izraz (4.1.)

Izmjenična struja se svake poluperiode nalazi u nuli. To nije slučaj kod istosmjerne struje, koju je nakon otvaranja kontakata prekidača potrebno postupno smanjivati dok ne dođe u nulu.



Slika 4.1. Prekidanje istosmjerne struje

$$E = iR + u_A + L \frac{di}{dt} \quad (4.1.)$$

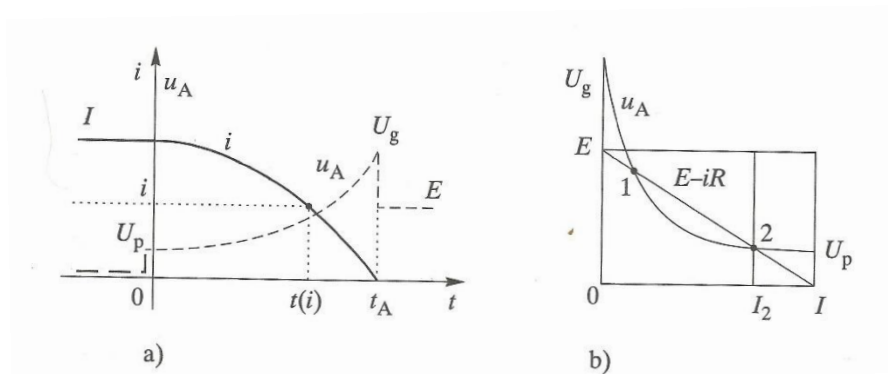
$$u_L = L \frac{di}{dt} = (E - iR) - u_A \quad (4.2.)$$

Kako bi se to dogodilo derivacija struje di/dt , a s time i pad napona na induktivitetu u_L , moraju biti manji od nule u području prekidnih struja.

$$\frac{di}{dt} < 0 \quad u_L < 0 \quad (4.3.)$$

Uzmemo li u obzir ove uvjete (4.3.), iz izraza (4.2.) dobivamo uvjet koji mora biti ispunjen kako bi došlo do gašenja električnog luka istosmjerne struje. Ovaj uvjet je poznat kao kriterij nestabilnosti luka (4.4.).

$$u_A > (E - iR) \quad (4.4.)$$



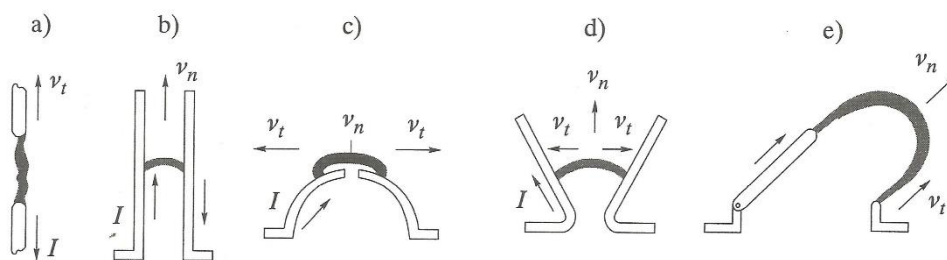
Slika 4.2. Prekid istosmjerne struje – oscilogrami

Oscilogrami sa slike 4.2. prikazuju prekidanje istosmjernog kruga uz pretpostavku da su se kontakti trenutno razdvojili u isto vrijeme kada se upalio luk. Na oscilogramu 4.2.a) vidimo da napon u_A mora biti iznad pravca $E-iR$, u cijelom radnom području, kako bi struja pala na nulu.

Na slici 4.2.b) označene su točke 1 – *labilna točka gorenja luka* te točka 2 – *stabilna točka gorenja luka*. Od trenutka paljenja luka do labilne točke gorenja luka ispunjen je uvjet (4.4.) te vrijednost struje pada. Kada se karakteristika napona luka i pravac $E-iR$ sijeku, ne može doći do prekida. U stabilnoj točki gorenja luka struja ima vrijednost I_2 , a nakon te točke uvjet je ponovo ispunjen te struja ponovo počinje padati. Postizanje nestabilnosti luka je neophodno za njegovo uspješno gašenje. Na trajanje gorenja luka utječe vremenska konstanta kruga, što je ona manja trajanje luka je kraće.

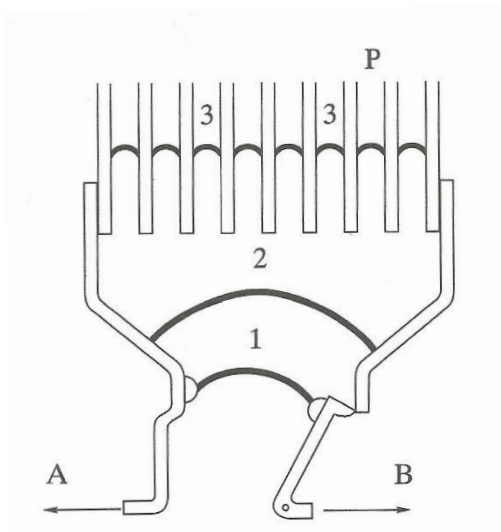
4.1. Sustavi za prekidanje istosmjerne struje

Gašenje istosmjernog električnog luka možemo postići prirodnim ili prisilnim sustavima. Prirodni sustavi luk gase uz pomoć mehaničkog ili elektromagnetskog razvlačenja, uzevši u obzir i relativno kretanje električnog luka kroz zrak. Kod elektromagnetskog razvlačenja pretpostavka je da se razvlačenje ostvari elektromagnetskim poljem struje luka kako je prikazano na slici 4.3.



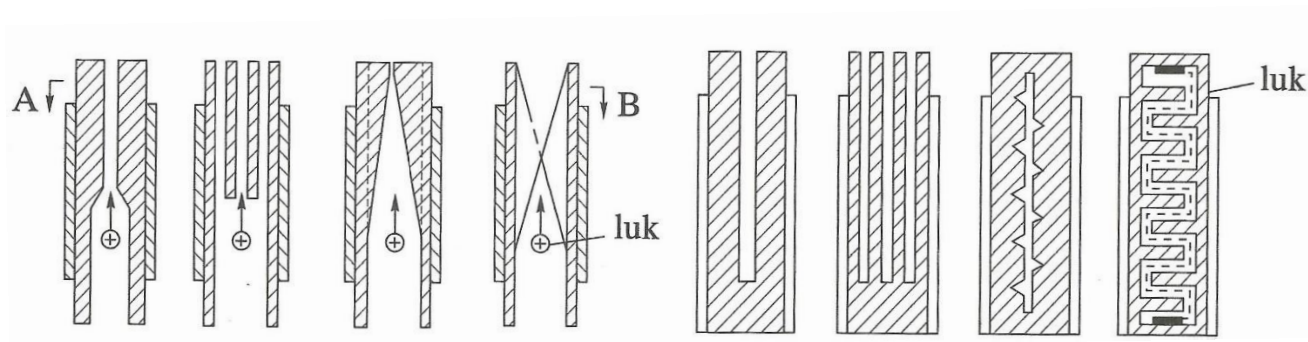
Slika 4.3. Prirodni sustav

Prisilni sustavi koriste magnetsko polje koje tjera luk u komoru koja je posebno oblikovana za prekidanje luka. Potrebno magnetsko polje se stvara u svitku za gašenje prolaskom prekidne struje kroz svitak. Primjer prisilnog sustava je prekidač s deionizacijskom rešetkom, tako zvani deion prekidač.



Slika 4.4. Deion prekidač – prekidač s deionizacijskom rešetkom

Na slici 4.4. prikazana je struktura deion prekidača. Prekidač je izveden od niza međusobno izoliranih ploča (Fe, Cu) koje, pri ulasku luka u rešetku, razbijaju isti na manje parcijalne lukove. Parcijalni lukovi se kroz rešetku kreću nejednoliko, to jest neki lukovi zaostaju pa počinju ići i u suprotnom smjeru pod utjecajem elektromagnetske petlje. Uzrok tomu je nejednak otpor pri kretanju luka u pojedinim ćelijama rešetke, a u potpunosti je stohastičke prirode.

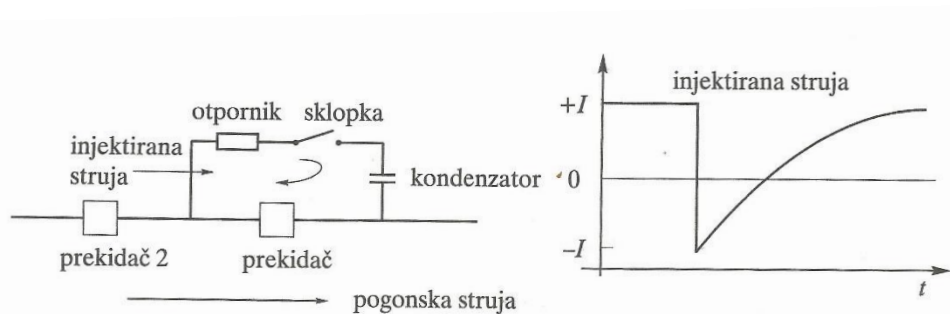


Slika 4.5. Magnetsko gašenje u uskom rasporu – izvedbe komora

Magnetsko gašenje u uskim rasporima kombinirano djeluje na električni luk. Kod ovih prekidača magnetsko polje tjera luk na brzi prolazak kroz uske raspore. Hladne izolacijske ploče intenzivno hlade luk, dok kretanje luka po kontaktima ga razvlači. Ovakvim kombiniranim djelovanjem električni luk se vrlo brzo gasi.

Prekidanje struje ovim metodama ovisi o uspješnosti razvlačenja i hlađenja luka. Za prekidanje luka viših napona potrebne su velike izolacijske ploče odnosno velike metalne rešetke. Zbog toga se ove metode ne primjenjuju na sustavima sa nazivnim naponom većim od 3 kV.

Jedna od metoda za gašenje luka kojeg nije moguće ugasiti razvlačenjem ili hlađenjem je metoda injekcije struje. Injektiranje struje suprotnog polariteta od struje koju treba prekinuti, prisilno dovodi struju u nulu. Pad struje nakon injektiranja dogodi se trenutno te nije moguće prekidanje struje u nuli. Nakon drugog prolaska struje kroz nulu, kao što je vidljivo na slici 4.6., struja se prekida prekidačem za izmjeničnu struju.



Slika 4.6. Injekcija struje

Otpornik u ovom krugu ograničava amplitudu injektirane struje kako bi bila malo veća od amplitude struje koja se prekida, a kondenzator se nabija polaritetom koji proizvodi struju suprotnog smjera.

5. TEHNIKE PREKIDANJA STRUJE U RAZLIČITIM MEDIJIMA

U povijesti se kao prva tehnika za prekidanje struje bilježi tehnika odvajanja kontakata na velike udaljenosti s ciljem onemogućavanja ponovnog paljenja električnog luka. Porastom pogonskih napona u elektroenergetskim sustavima ova tehnika se prestaje koristiti, a započinje razvoj specijalnih aparata za prekidanje struje koje danas nazivamo prekidači.

Prekidna energija, %	Prekidna tehnika	napon, kV								
		0	1	3	12	24	36	72,5	245	765
100	zrak									
	ulje									
	komprimirani zrak									
20	SF ₆									
	vakuum									
5	poluvodiči									

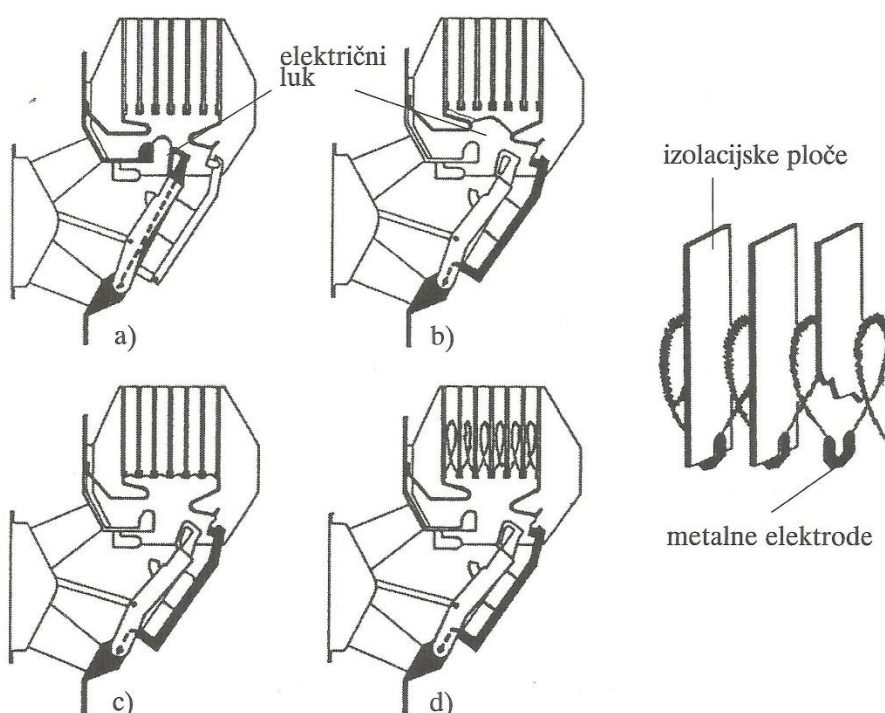
Slika 5.1. Područja rada nekih tehnika za prekidanje struje

5.1. Prekidanje struje u zraku

Zrak kao medij za gašenje električnog luka u visokonaponskim prekidačima unatoč činjenici da je besplatan, iznimno lako dostupan te posjeduje dobra izolacijska svojstva ima i nedostataka. Naime, pri gorenju električnog luka u zraku atmosferskog tlaka oslobađa se vrlo visoka temperatura koja zagrijava okolni zrak i time znatno otežava hlađenje i deionizaciju. Također postoji i vrlo velika opasnost od preskoka među kontaktima ili prema zemlji. Zrak nije u potpunosti elektronegativan plin (iako kisik je, u određenoj mjeri), a u odnosu na neke druge medije (vodik ili SF₆) ima relativno malu toplinsku vodljivost. Zbog toga je i vremenska konstanta električnog luka vrlo velika, a kada struja prođe kroz nulu između kontakata nastaje široki sloj vodljive plazme kojemu treba dosta vremena da se deionizira.

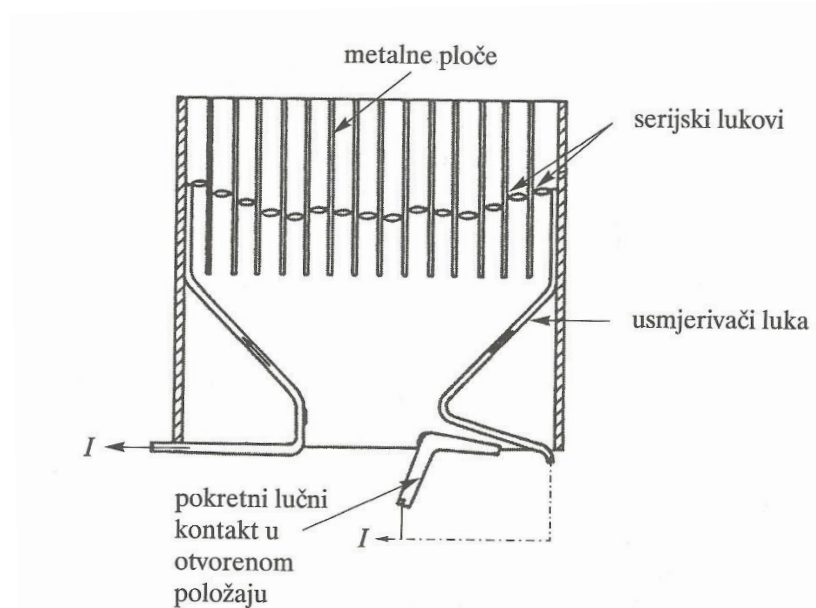
Kako bi uspješno prekinuli struju u zraku s atmosferskim tlakom moramo povećati otpor luka a s time i napon luka. Povećanje otpora luka možemo postići hlađenjem samog luka, povećanjem njegove duljine te razbijanjem luka na više manjih lukova. Povećavamo otpor, odnosno napon, dok napon luka ne bude veći od napona izvora. Od tog trenutka toplinska energija koju luk prima od izvora je manja od energije koju luk predaje okolini, a rezultat toga je veoma brzo gašenje luka. U današnje vrijeme komore za gašenje električnog luka se najčešće sastoje od kombinacije najmanje dva načina za prekidanje luka, a osnovni tipovi komora su:

- komora s izoliranim pločama – intenzivno rastezanje luka te hlađenje preko zraka i posebnih ploča od vatrostalnog materijala (Slika 5.2.)



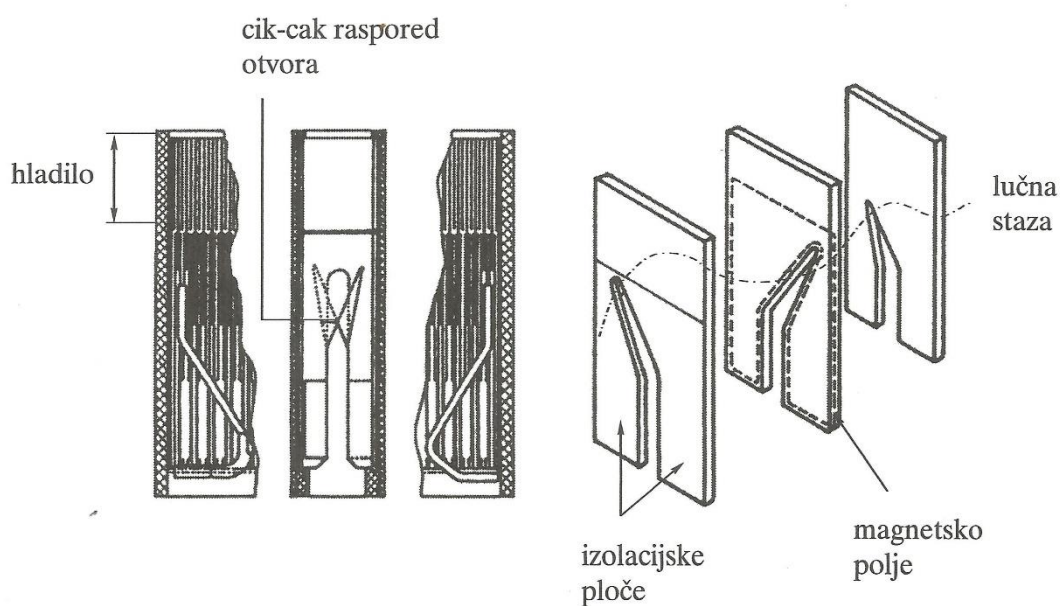
Slika 5.2. Komora s izoliranim pločama – Solenarc; a) trenutak odvajanja kontakata, b) prebacivanje luka s kontakata na rogove komore, c) i d) rastezanje luka

- komora s metalnim pločama – luk se razbija na manje serijski spojene lukove, a hlađenje se odvija preko zraka te kondukcijom u dodiru s hladnim metalnim pločama. (Slika 5.3.)



Slika 5.3. Komora s metalnim pločama

Kada je u pitanju tehnika prekidanja koja gasi luk razvlačenjem, to razvlačenje treba biti što veće te se ne smije dogoditi dok je struja prejaka. Prerano razvlačenje izaziva nepotreban gubitak energije, a može izazvati i oštećenja. Komora treba biti dizajnirana tako, da za vrijeme trajanja luka, luk se sve više razvlači i prolazi kroz raspore koji se sve više sužavaju. Komora s cik-cak stazom postiže takav efekt različitim poprečnim presjecima te specifičnom cik-cak stazom kroz koju se razvlači luk. (Slika 5.4)



Slika 5.4. Komora s cik-cak stazom

Važna karakteristika zračnog prekidača je i otpor luka koji je relativno mali. To sve više guši povratni napon, a može se i modificirati u tolikoj mjeri da problem povratnog napona u mreži bude zanemariv. Primjena posebnih izolacijskih ploča izrađenih od keramike, koje veoma efikasno hlade električni luk, te precizno konstruirane komore za rastezanje luka, koje razvlače luk na vrlo velike duljine uz vrlo male dimenzije, daje zračnim prekidačima veliku vrijednost. Jednostavnost konstrukcije, minimalne potrebe održavanja, dug vijek trajanja su neki od razloga zašto su ovi prekidači često u upotrebi. Budući da ne izaziva sklopne prenapone i veoma je pouzdan tip prekidača koristi se u srednjenaponskim sklopnim aparatima diljem Amerike. Što nije slučaj u Europi gdje su zračni prekidači gotovo potpuno istisnuti iz upotrebe razvojem malouljnih i vakuumskih prekidača. Na niskim naponima zračni prekidači i dalje nemaju konkurencije, dok na visokim naponima problem nastaje zbog prevelikih dimenzija potrebnih komora te izolacijski razmaci u zraku.

5.2. Prekidanje struje u ulju

Kod uljnih prekidača električni luk zapravo gori u plinu i to najčešće u vodik. Do toga dolazi zbog visoke temperature koja se razvija za vrijeme gorenja luka, a može doseći i deset tisuća kelvina. Gorenjem na tim temperaturama ulje, neposredno uz luk, isprava i stvara mjehur plina. Dok je temperatura maksimalne disocijacije zraka oko 7000 K, kod vodika ona iznosi 4500 K i još uvijek je iznad temperature gašenja luka. Ako je potrebna veća prekidna moć koristi se sistem više serijski spojenih mjesta prekida kako bi se smanjilo mehaničko naprezanje izolatora. Naime s porastom energije luka raste i količina oslobođenog plina koji, naglo oslobođen, stvara udarni tlak koji se prenosi na zidove porculanskih izolatora.

Bauerova relacija [4] nam omogućava određivanje količine plina koji se oslobađa djelovanjem luka:

$$V_0 = C_0 W_A \quad (5.1.)$$

Gdje je:

V_0 obujam oslobođenog plina (reduciran na $T_0=20^\circ\text{C}$, $p_0=10^5$ Pa) (m^3)

W_A energija luka (J)

C_0 Bauerov koeficijent ($60\text{m}^3/(\text{kWs})$) za ulje)

Ako dopunimo poznatu relaciju stanja idealnog plina (5.2.) te uvrstimo (5.1.) u (5.2.) dobivamo jednadžbu za stvarni obujam plina nastalog gorenjem luka (5.3.):

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0} \quad (5.2.)$$

Gdje je:

- p tlak plina (Pa)
T temperatura plina (K)

$$V = W_A C_0 \frac{p_0}{p} \frac{T}{T_0} \quad (5.3.)$$

Iz izraza (5.2.) možemo izvesti izraz maksimalnog tlaka plina u komori:

$$p_{maks} = p_0 \frac{V_0}{V_k} \frac{T}{T_0} \quad (5.4.)$$

Gdje je:

- V_k stvarni obujam plinskog mjehura (m^3)

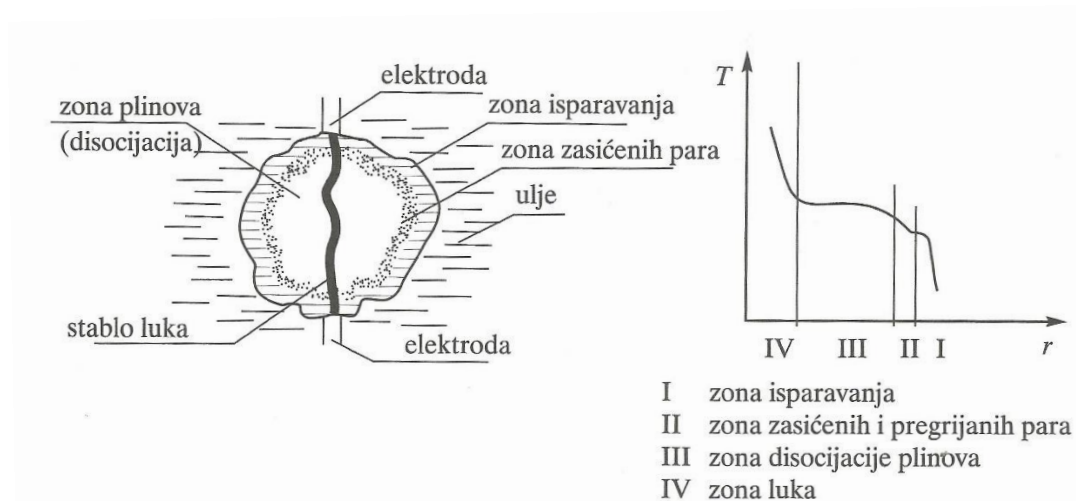
Također iz izraza (5.2.) možemo odrediti masu plina (5.5.):

$$m = \frac{p_0V_0}{R_sT_0} = \frac{p_0}{R_sT_0} C_0 W_A \quad (5.5.)$$

Gdje je:

- m masa plina (kg)
 R_s specifična plinska konstanta (J/(kgK))

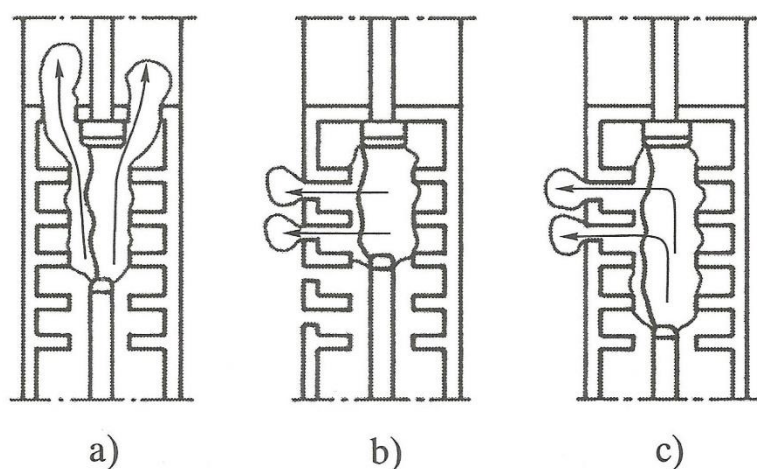
Većinski sastojak plinskog mjehura je vodik (65% - 80%), zatim acetilen i etan (oko 25%) te metan (10%). Također se pojavljuju manje količine nekih drugih sastojaka. Plinski mjehur je, zbog razlike u temperaturi, slojevit kao što je prikazano na slici 5.5.. Na slici je i dijagram s prikazom raspodjele temperature u mjehuru.



Slika 5.5. Plinski mjehur u ulju

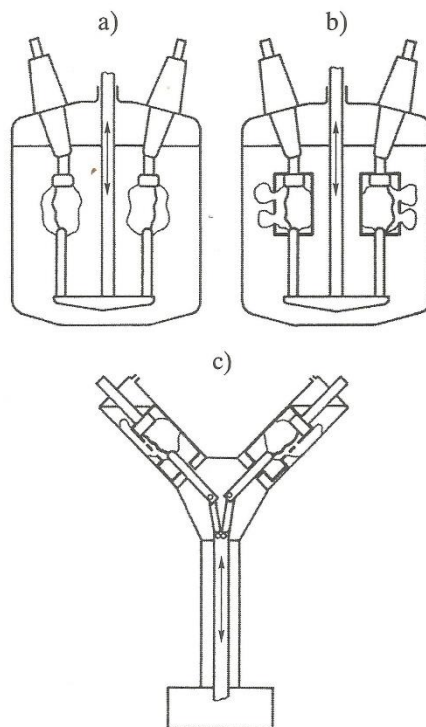
Dvije su izvedbe uljnih prekidača. Izvedba koja koristi manje ulja ima kućište izolirano od zemlje, dok je druga izvedena s metalnim uzemljenim kućištem. Prekidači s metalnim uzemljenim kućištem u starijim verzijama nisu imali zasebnu komoru za gašenje već se luk prekidao uranjanjem kontakata u kotao s uljem. Modernije izvedbe su izvedene s komorom za gašenje koje trpe veći tlak nego ostatak kotla.

Komore za gašenje luka, kod uljnih prekidača, mogu biti izvedene s uzdužnim ili poprečnim strujanjem plina. Na slici 5.6.a) prikaz je izvedbe s uzdužnim strujanjem, a na slikama 5.6.b) i c) prikazane su izvedbe s poprečnim strujanjem plina.



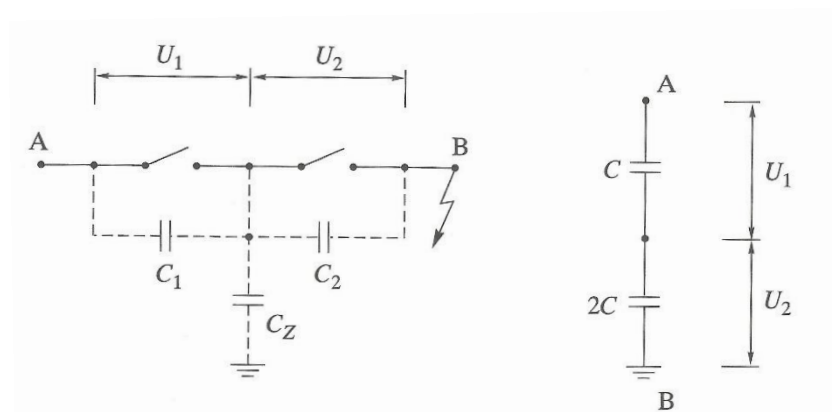
Slika 5.6. Izvedbe komora za gašenje kod uljnih prekidača

U izvedbi s uzdužnim strujanjem plinovi prolaze kroz uski procjep pa je zbog toga tlak vrlo velik, dok u slučaju komore s poprečnim strujanjem postoje bočni otvori koji smanjuju tlak u komori. Obično se koriste kombinirane komore koje imaju samo srednje pregrade s bočnim otvorima, dok su gornje i donje izvedene bez bočnih otvora (Slika 5.6.c)).



Slika 5.7. Osnovni tipovi uljnih prekidača – a) uzdužno strujanje, b) poprečno strujanje, c) izvedba s posebnom komorom za gašenje

Kod serijski spojenih komora raspodjela povratnog napona ovisi o kapacitivnim otporima otvorenih komora (Slika 5.8.)



Slika 5.8. Raspodjela povratnog napona na serijski spojenim komorama

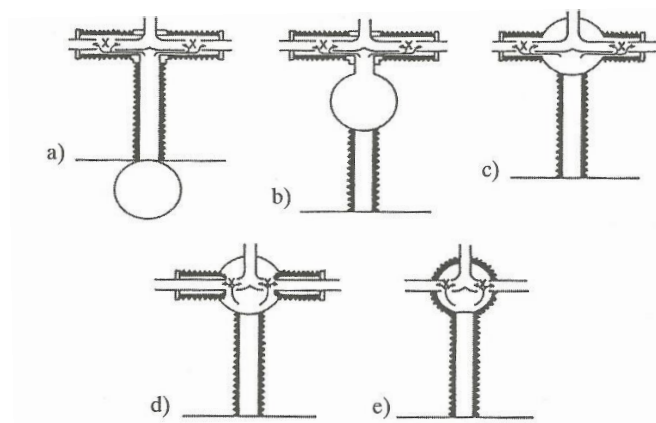
Prekidne komore su jednake pa vrijedi $C_1=C_2$ i $C_{Z\sim}C_1=C_2=C$, a za slučaj pojave kratkog spoja u točki B vrijedi sljedeći izraz:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{\frac{1}{2\omega C}} = 2 \quad (5.6.)$$

Skoro duplo veći povratni napon javlja se na komori koja je udaljenija od kratkog spoja. Na prekidnoj komori pojavljuje se oko 33% ukupnog napona. Paralelnim spajanjem visokonaponskog kondenzatora s prekidnim komorama rješava se problem nejednake raspodjele napona na prekidne komore tijekom prekidanja struje.

5.3. Prekidanje struje u stlačenom zraku

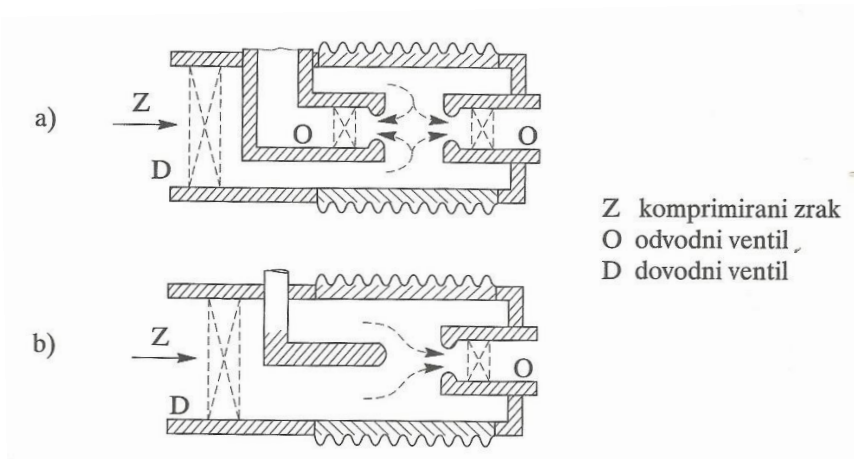
Sve više nesreća kao što su požari i eksplozije povezanih s uljnim prekidačima dovelo je, oko 1930., do prvog eksperimentiranja sa stlačenim zrakom. Stlačeni zrak, kao i ostali stlačeni plinovi, posjeduje bolja termička i dielektrična svojstva od zraka atmosferskog tlaka. Veća gustoća plina uzrokuje više sudara među česticama, a samim time i bržu izmjenu topline, bržu rekombinaciju, bržu deionizaciju. Postizanje dielektrične čvrstoće međukontaktnog prostora postiže se mehaničkim istiskivanjem plazme, odnosno snažnim i brzim strujanjem hladnog zraka. Približavanjem struje ka nuli, luku koji gori u zraku naglo se povećava presjek te smanjuje električna vodljivost plazme, luk gubi kompaktnost i postaje lakše mehanički ga deformirati. Svi prekidači sa stlačenim plinom, pa tako i ovi zračni, svrstani su u skupinu prekidača s nezavisnom karakteristikom gašenja. Što znači da su tlak i količina plina te brzina strujanja neovisni o struji. Položaj zračnih komora te način dovođenja zraka u komoru određuju o kojoj izvedbi pneumatskih prekidača se radi (Slika 5.9.)



Slika 5.9. Izvedbe pneumatskih prekidača

Prva izvedba (slika 5.9.a)) je među najpopularnijim izvedbama za sustave srednjeg napona, dok u sustavima visokog napona problem predstavlja udaljenost komore i rezervoara, koja ima dosta utjecaja na vrijeme kašnjenja. Izvedbe koje su prikazane pod b), c) i d) vrlo su slične, posjeduju skoro idealne uvjete za strujanje, a prednost im je i izbjegavanje šupljih potpornih izolatora koji su otporni na velike tlakove. Visoko težište te velika površina pod naponom predstavljaju nedostatke ovih izvedbi. Tehnički najbolje rješenje prikazano je pod e), iako je izvedba skupa i tehnološki teško izvediva zbog zračnog spremnika koji je napravljen od izolacijskog materijala.

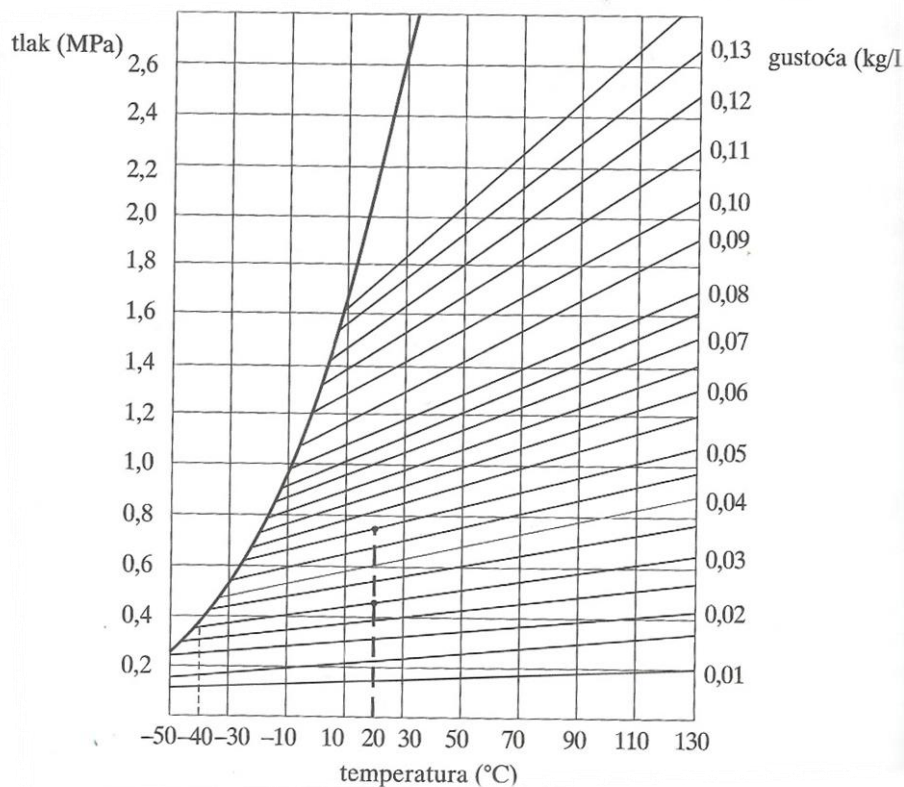
Stlačeni zrak se može usmjeriti na luk poprečnim i uzdužnim strujanjem. Moderni pneumatski prekidači koriste samo uzdužno strujanje i to tako da se luk natjera u os koja se preklapa s osi sapnice. Dvije izvedbe sapnice koje se koriste su izvedba s jednom izoliranom sapnicom (slika 5.10.a)) te s dvije metalne sapnice pod b).



Slika 5.10. Tipovi sapnica

5.4. Prekidanje struje u sumpornom heksafluoridu (plin SF₆)

Odlična deionizacijska ali i dielektrična svojstva ovog plina skoro pa su u potpunosti izbacila ostale medije iz upotrebe u visokonaponskim prekidačima. Do temperature od 500°C i pri atmosferskom tlaku ovaj plin je potpuno kemijski stabilan, a osim toga je neagresivan, nezapaljiv, neotrovan te bez mirisa i boje. Plin SF₆ se dobiva pod posebnim uvjetima sintezom fluora i sumpora u tekućem stanju. Na slici 5.11 prikazana je krivulja koja prikazuje malu promjenu gustoće plina pri promjeni tlaka i temperature.

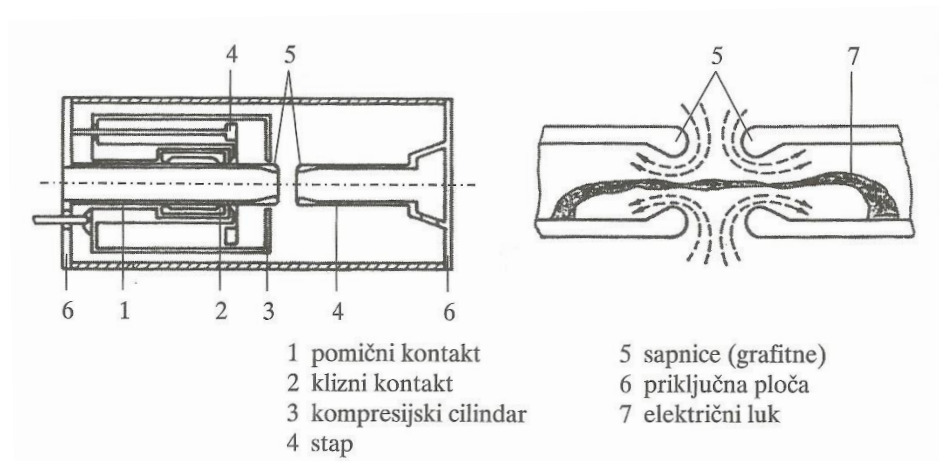


Slika 5.11. Konstanta gustoće SF₆ plina

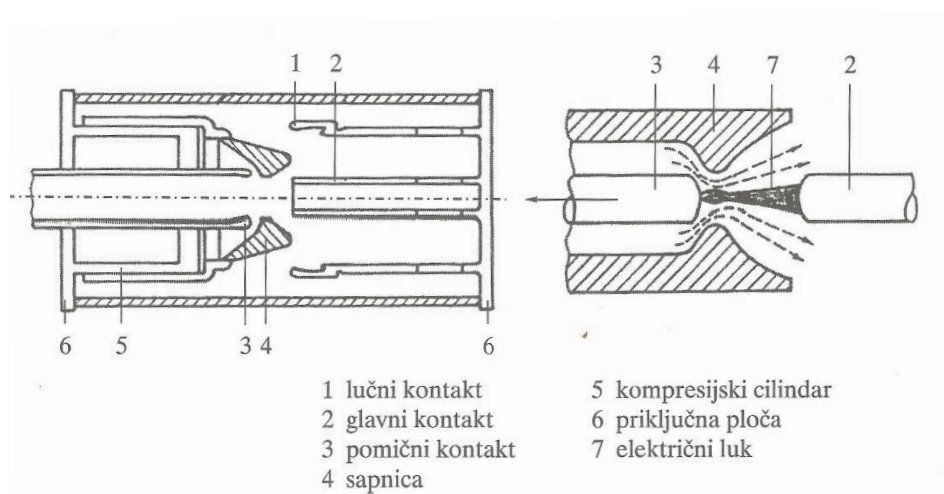
SF₆ je sastavljen od električki neutralnih molekula, kao i ostali dielektrični plinovi, pa pod djelovanjem neke vanjske ionizacije oslobađaju se slobodni elektroni u plinu. Jako električno polje između elektroda u plinovitom dielektriku može izazvati lavinu elektrona, odnosno u konačnici do proboja. U slučaju SF₆ plina, njegova izrazita elektronegativnost, početne elektrone, koji se slobodno sudaraju s neutralnim nabojima, vrlo brzo veže s neutralnim molekulama i stvara teško pokretne negativne ione. Također zbog elektronegativnosti ima i dosta veću dielektričnu čvrstoću u odnosu na zrak.

Visokonaponski SF₆ prekidači se mogu podijeliti na dvije izvedbe: dvotlačne prekidače te jednotlačne autokompresijske prekidače. Dvočlani se uglavnom koriste u Americi kod najviših napona, a jednočlani autokompresijski se koriste u visokonaponskim sustavima u Europi. Jednotlačni prekidači s SF₆ plinom su pod tlakom od 0,3 do 0,7 Mpa, a veći tlak je moguće postići autokompresijom u vremenu isklapanja.

Prema izvedbi sapnica prekidači mogu biti s dvije metalne sapnice (slika 5.12.) ili s jednom izoliranom sapnicom (5.13), a obje izvedbe su jednako zastupljene kod proizvođača SF₆ prekidača za visoke napone.



Slika 5.12. Izvedba s dvije metalne sapnice

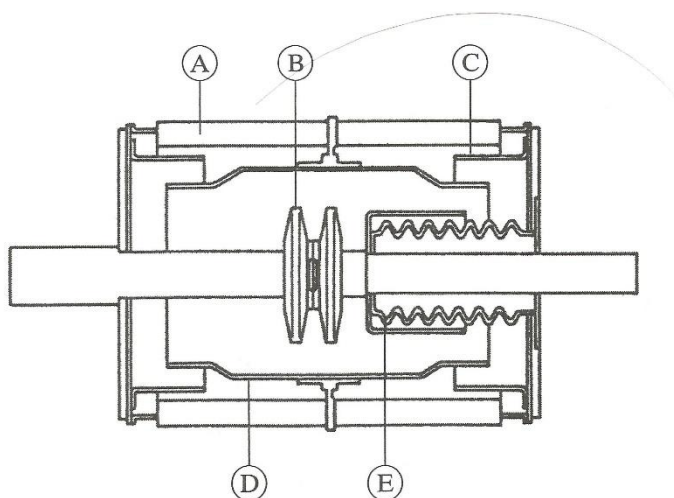


Slika 5.13. Izvedba s jednom izoliranom sapnicom

5.5. Prekidanje struje u vakuumu

Prvi pokusi paljenja električnog luka u vakuumu izvedeni su 1809. godine, zatim su prva istraživanja probojnog napona u vakuumu počela 1897. godine. Slijedi izrada prve komore s dinamičkim vakuumom 1923., te 1925. sa statičkim vakuumom. Najveći nedostaci prvih komora bile su velike količine plinova koji su se oslobađali na kontaktima za vrijeme prekida luka te često zavarivanje kontakata. Napretkom tehnologije materijala te vakuumske tehnologije, 1960. godine izrađuju se prve komercijalne komore za vakuumske prekidače. Današnje komore za vakuumske prekidače izvedene su za nazivne napone do 84 kV, nazivne struje do 4 kA te prekidne moći do 100 kA.

Na sljedećoj slici (slika 5.14.) prikazan je shematski presjek vakuumske prekidne komore. Kontakt koji je pomičan, pričvršćen je na komoru s elastičnim mijehom (E) kao što je prikazano na slici, a zasloni (C) i (D) štite unutrašnjost izolacijskog tijela (A) od kondenzacije. [5]



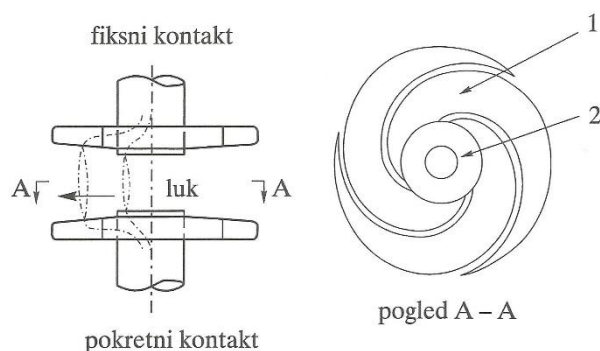
Slika 5.14. Shematski presjek vakuumske komore

Za gorenje električnog luka u vakuumu karakteristične su katodne mrlje koje se veoma brzo i nasumce gibaju po katodi. Zbog visoke temperature katodnih mrlja isparava materijal iz katode i tvori izvor električnog luka, dakle luk zapravo gori na metalnim parama. Ovisno o struji luk u vakuumu može biti difuzni luk ili koncentrirani luk.

Difuzni luk se pojavljuje pri struji od 100 A do 10 kA, gdje se katodna mrlja dijeli na više mrlja zbog temperature. Električni luk se tada sastoji od više mali parcijalnih lukova s početkom na katodi te difuznim širenjem prema anodi. Rezultat takvog gorenja je slabo stvaranje metalnih para te mala oštećenja na kontaktima.

Kod struja većih od 10 kA veći je utjecaj magnetskog polja na gibanje elektrona. Zbog toga se smanjuje srednji put elektrona što uzrokuje sve češće sudare čestica. Pad napona raste te ubrzava elektrone i usporava pozitivne ione, što vodi do anodne zone ionizacije. Struja se koncentrira na područjima s dovoljnom gustoćom metalnih para za ionizaciju neutralnih čestica, što izaziva sužavanje luka pri anodi te stvaranje anodne mrlje [7]. Sužavanje luka se događa i na katodi te nastaje samo jedan luk koji generira veliku količinu metalnih para i dosta oštećuje elektrode. Povećanjem prekidne struje dobivamo koncentrirani luk s toplom katodom te s anodnom mrljom. Više nije moguće prekidanje struje pri prvom prolasku kroz nulu te se trajanje luka produljuje i do 15 ms. Važan faktor je anodna mrlja koja ograničava prekidnu moć, budući da i nakon što struja dođe u nulu se veoma sporo hladi, a sadrži i veliki volumen materijala kontakata.

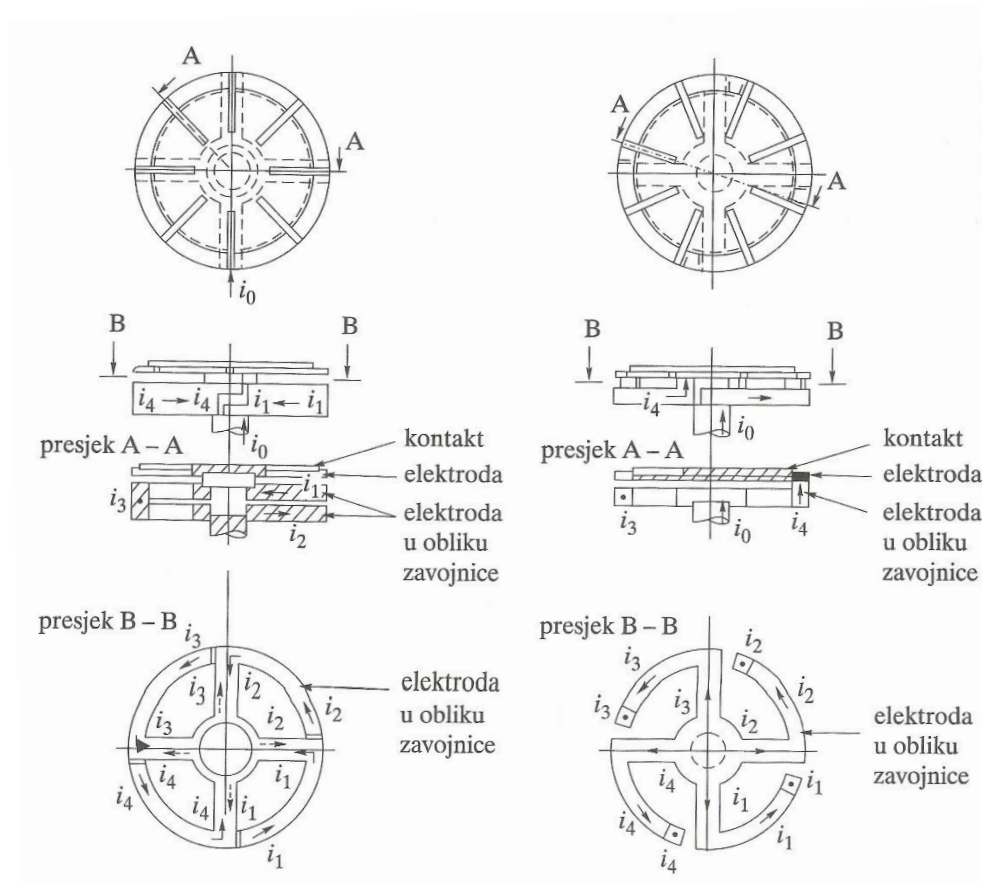
Za postići veliku prekidnu moć treba ravnopravno raspodijeliti toplinsku energiju koja se stvara na kontaktima. Potrebno je naći rješenje koje uz minimalno rezanje struje osigurava minimalno trošenje kontakata. Rezanje struje je prisutno gotovo u svim tehnikama prekidanja, a izvodi se u vrijeme kada struja ima nižu vrijednost, odnosno kad je blizu nule. Moguće je da nestajanje nositelja naboja prevlada procese njihovog stvaranja pa luk postaje nestabilan te ga je moguće ugaziti prije dolaska struje u nulu. Difuznim oblikom luka smanjujemo oštećenje kontakata, a održavanjem luka stabilnim do malih vrijednosti struje osiguravamo rezanje struje minimalnim. Zato moderne vakuumske komore imaju čeonu tip kontakata te djelovanje nekog magnetskog polja na luk.



Slika 5.15. Elektrode koje tvore radijalno magnetsko polje

Najčešći je izbor radijalnog magnetskog polja s vlastitim strujnim petljama koje su formirane specijalnom geometrijom kontakata (slika 5.15.). Cilj ove metode je postizanje rotacije luka po cijeloj površini elektrode što sprječava sužavanje luka. Prekidanje struje se vrši u prvoj nul točki a anoda ostaje hladna zbog brzine pomicanja korijena luka po površini elektroda.

Za prekid većih struja moramo povećati i površinu kontakata ali i obujam prekidne komore. To je razlog zašto se ovaj tip uglavnom koristi za prekidače s prekidnom moći manjom od 40 kA. Novije izvedbe ovakvih komora koriste djelovanje aksijalnog, odnosno uzdužnog magnetskog polja (slika 5.16.)



Slika 5.16. Elektrode koje tvore aksijalno magnetsko polje

6. SINKRONO PREKIDANJE STRUJE

U samim počecima razvoja smatralo se da je metodom sinkronog sklapanja moguće u potpunosti izbjeći električni luk. Ideja je bila da se kontakti otvore toliko brzo da probojni napon među kontaktima u svakom trenutku bude veći od povratnog napona. [4] Takva brzina u praksi nije izvediva, a sama izvedba bi zahtijevala iznimnu mehaničku preciznost. Sada se pod sinkronim sklapanjem smatraju sva sklapanja kod kojih je potrebno trenutak isklopa ili uklopa odabrat u odnosu na sinusoidu struje.

6.1. Sklapanje kondenzatorskih baterija

6.1.1. Uklapanje kondenzatorskih baterija

Kondenzatorske baterije spajamo na mrežu u trenutku nultočke pogonskog napona kako bi izbjegli velike potezne struje. Izvedba mase nultočke baterije utječe na stvarni moment uklapanja polova prekidača, a kondenzator treba biti prazan prije početka uklapanja.

Kako bi uspješno uklopili u nultočki napon, neposredno prije nultočke, mora se zadovoljiti uvjet da brzina smanjivanja podnosivog napona bude veća od brzine promjene narinutog napona na međukontaktom razmaku.

$$\frac{d(u_d)}{dt} > \frac{du}{dt} = \omega U \quad (6.1.)$$

Tjemena vrijednost napona U ovisi o izvedbi uzemljenja nultočke, a može biti kruto uzemljena kondenzatorska baterija te kondenzatorska baterija s izoliranom nultočkom.

6.1.2. Isklapanje kondenzatorskih baterija

Kod isklapanja kondenzatorskih baterija, nakon približno 10 ms, na kontaktima se pojavljuje povratni napon čija je amplituda dvostruko veća od amplitude narinutog napona. Ako tada kontakti nisu na dovoljnoj udaljenosti dolazi do preskoka te pojave prenapona. Sinkrono prekidanje bi izbjeglo ovaj problem otvaranjem kontakata prije nego struja dođe u nulu.

6.2. Sklapanje induktivnih trošila

6.2.1. Uklapanje induktivnih trošila

Uklapanje induktivnih trošila je lakše izvesti za vrijeme tjemene vrijednosti napona nego u nultočki. Tada se pretpaljenje luka događi u trenutku približno trenutku tjemene vrijednosti napona. Takvu metodu pretpaljenja električnog luka imaju i suvremeni SF₆ prekidači.

6.2.2. Isklapanje induktivnih trošila

Potrebno je izbjeći prvo ponovno paljenje kako bi se izbjegla velika dielektrična naprežanja. U praksi se to izvodi sinkronizacijom razdvajanja kontakata prekidača s nulom struje, kako bi gašenje luka započelo kada je razmak kontakata dovoljan, a izvedivo je ako se kontakti počnu razdvajati nekoliko milisekundi prije nule struje.

7. IZBOR PREKIDAČA

Nazivni napon, nazivna struja i nazivna prekidna moć su glavne karakteristike za izbor odgovarajućeg prekidača.

Nazivna struja, prema relaciji (7.1.), mora imati veću vrijednost od najveće moguće struje kroz prekidač:

$$I_n \geq \frac{S_{max}}{\sqrt{3}U_n} \quad (7.1.)$$

Efektivna vrijednost struje dana je izrazom (7.2.):

$$I_r = \sqrt{I_s^2 + I_a^2} \quad (7.2.)$$

Određivanje prekidne moći prekidača prikazano je izrazom (7.3.):

$$S = \sqrt{3}U_p I_r \quad (7.3.)$$

Gdje je:

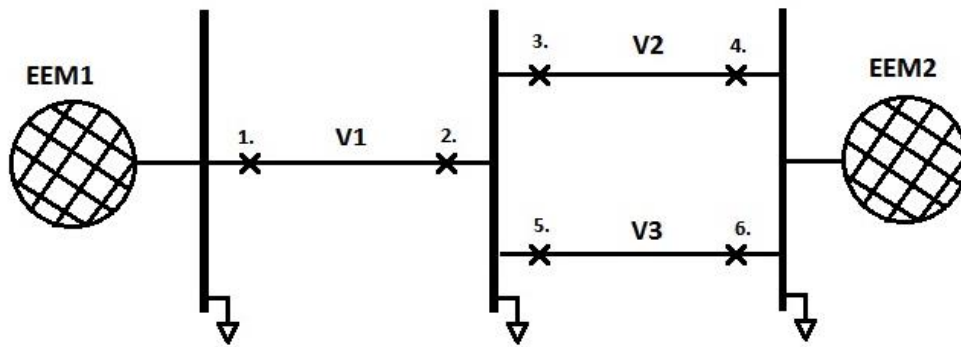
U_p linijski napon na mjestu prekidača

I_r efektivna vrijednost struje

Tablica 7.1. IEC standard za nazivne prekidne moći

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	-	-	-

8. PRIMJER PRORAČUNA STRUJA KRATKOG SPOJA



Zadano:

$$U_n = 110kV$$

$$EEM1 \quad S''_{K3} = 7500MVA$$

$$EEM2 \quad S''_{K3} = 9000MVA$$

$$x_{EEM1} = \frac{cU_n^2}{S''_{K3}} = j1,7746\Omega$$

$$x_{EEM2} = \frac{cU_n^2}{S''_{K3}} = j1,4788\Omega$$

$$V1 \quad x_1 = j0,42 \frac{\Omega}{km} \quad l_1 = 100km$$

$$x_{V1} = x_1 l_1 = j42\Omega$$

$$V2 \quad x_2 = j0,4 \frac{\Omega}{km} \quad l_2 = 80km$$

$$x_{V2} = x_2 l_2 = j32\Omega$$

$$V3 \quad x_3 = j0,4 \frac{\Omega}{km} \quad l_3 = 80km$$

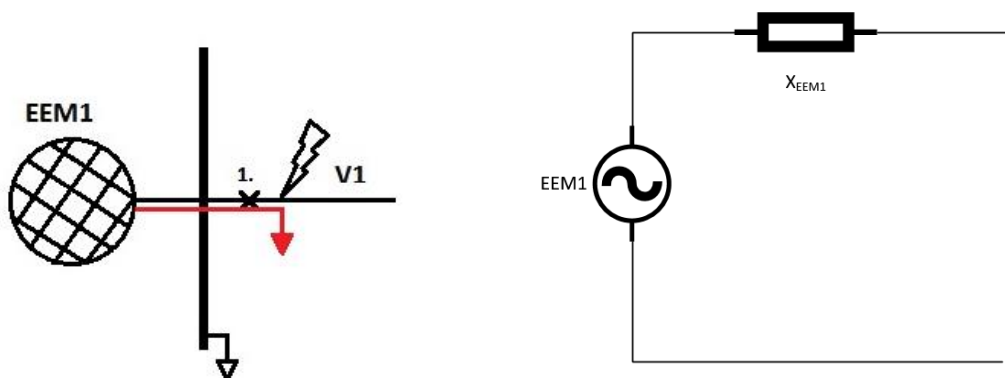
$$x_{V3} = x_3 l_3 = j32\Omega$$

Postupak:

Stanje na vodu V1

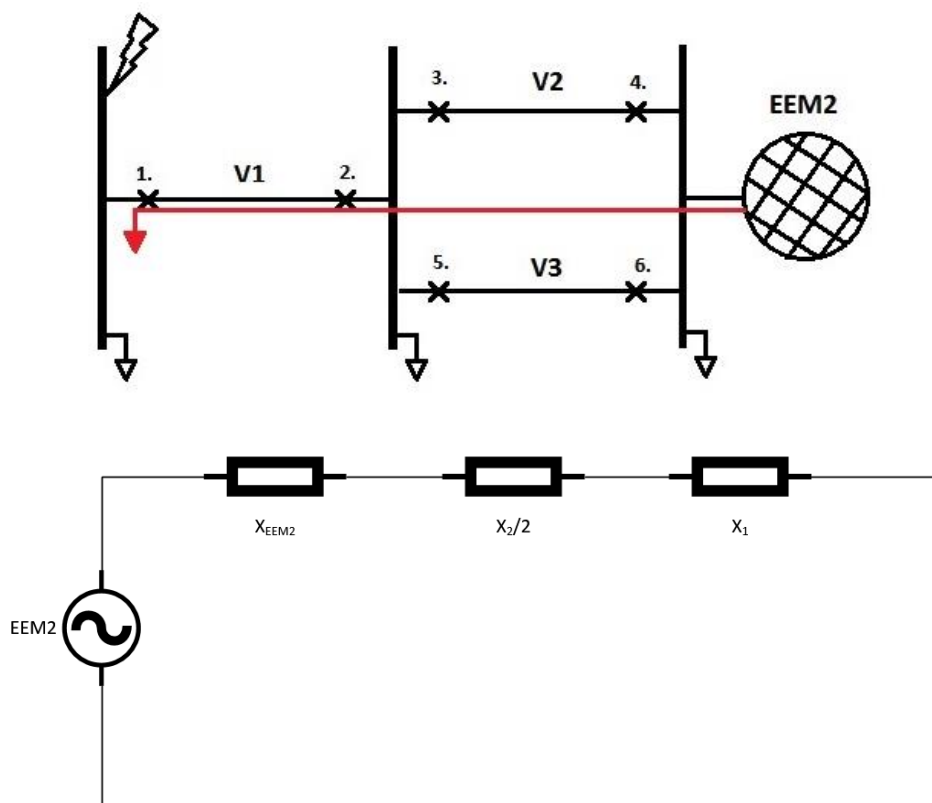
1.

a) Kvar na vodu



$$I_{1a} = \frac{\frac{U_m}{\sqrt{3}}}{X_{EEM1}} = 35,787kA$$

b) Kvar na sabirnici



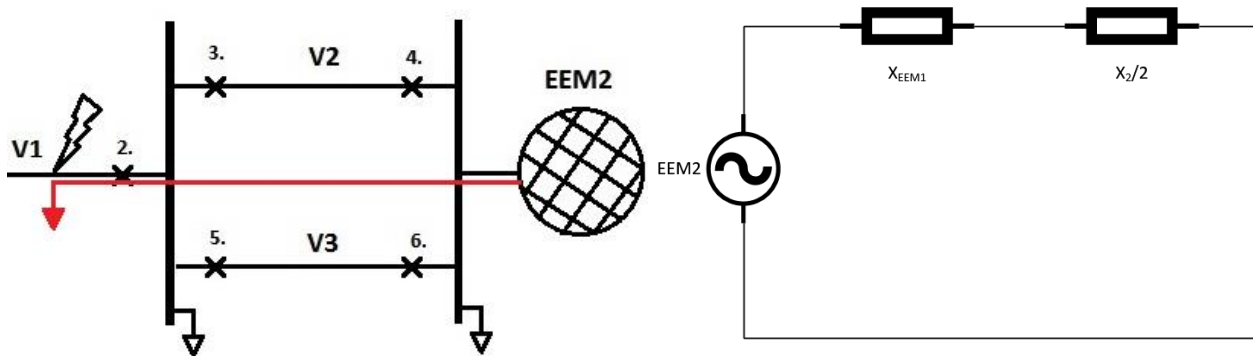
$$I_{1b} = \frac{\frac{U_m}{\sqrt{3}}}{X_{EEM1} + \frac{x_{V2}}{2} + x_{V1}} = 1,062kA$$

$$I_{1a} > I_{1b}$$

$$S_{V1,1} = \sqrt{3}U_n I_{1a} = 6818,339MVA$$

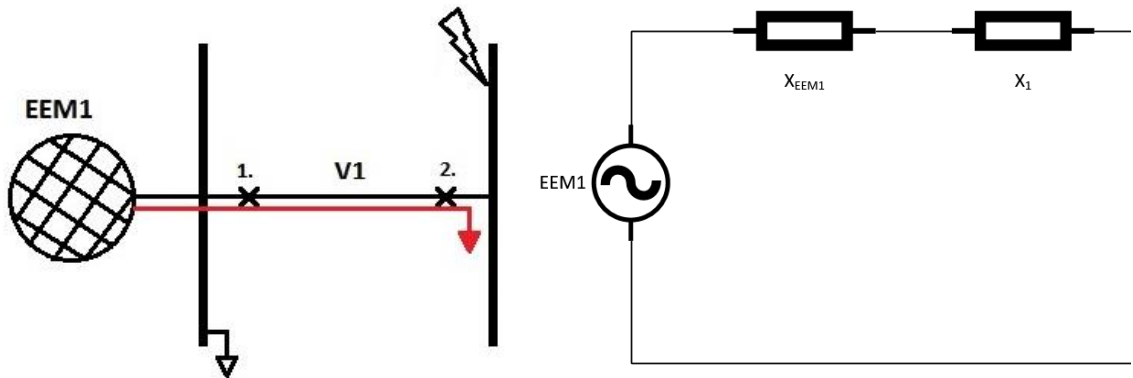
2.

a) Kvar na vodu



$$I_{2a} = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{x_{EEM2} + \frac{x_{V2}}{2}} = 3,633kA$$

b) Kvar na sabirnici



$$I_{2b} = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{x_{EEM1} + x_{V1}} = 1,450kA$$

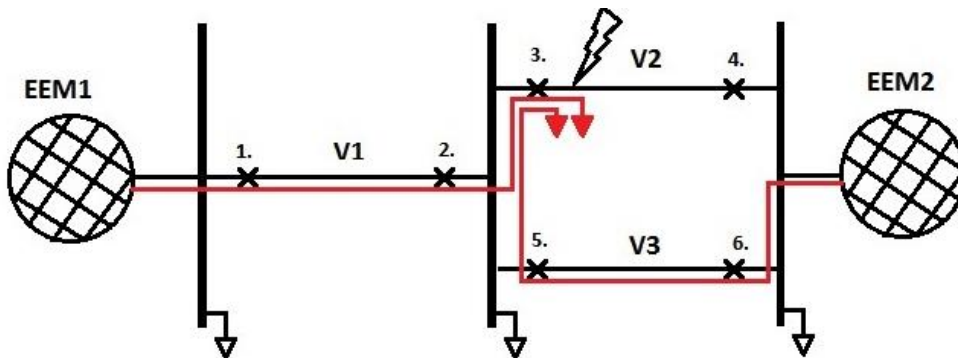
$$I_{2a} > I_{2b}$$

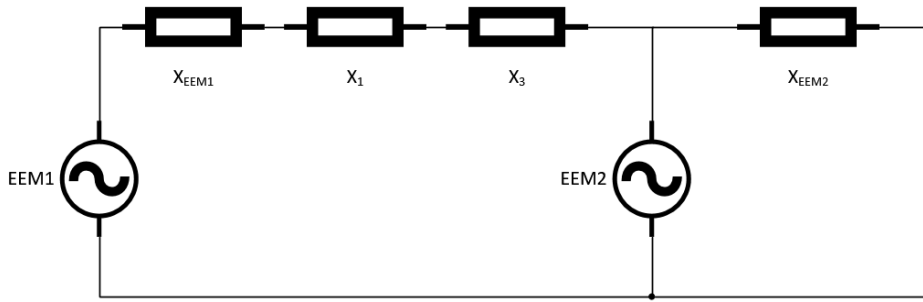
$$S_{V1,2} = \sqrt{3}U_n I_{2a} = 692,179MVA$$

Stanje na vodu V2

3.

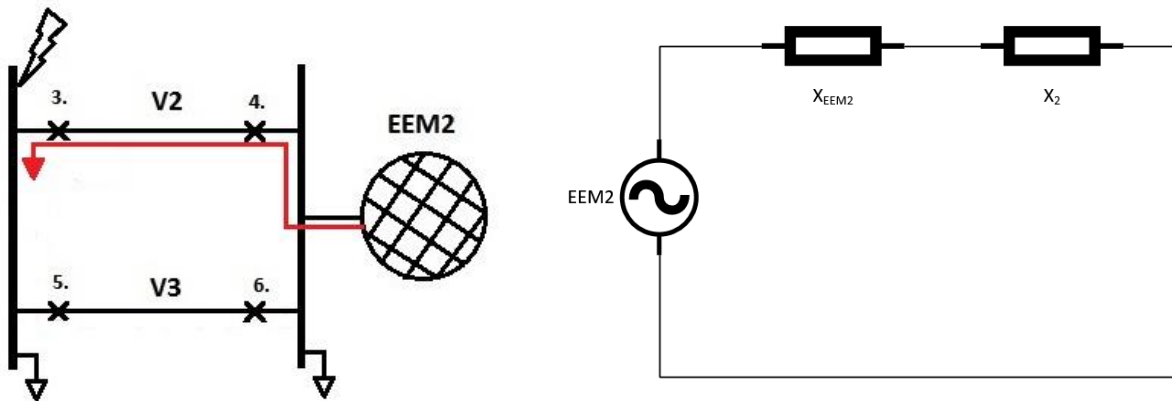
a) Kvar na vodu





$$I_{3a} = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{x_{EEM1} + x_{V1}} + \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{x_{EEM2} + x_{V3}} = 3,347kA$$

b) Kvar na sabirnici



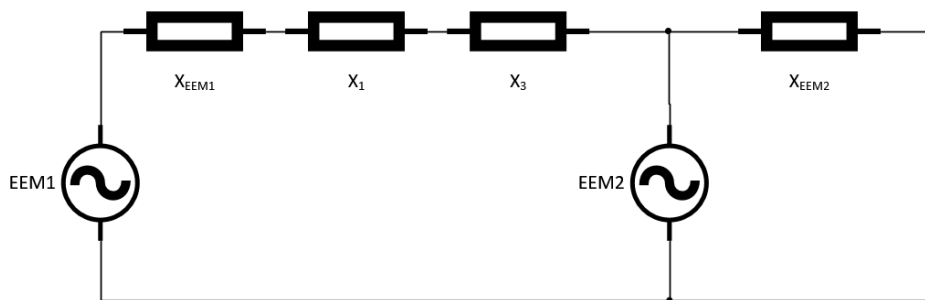
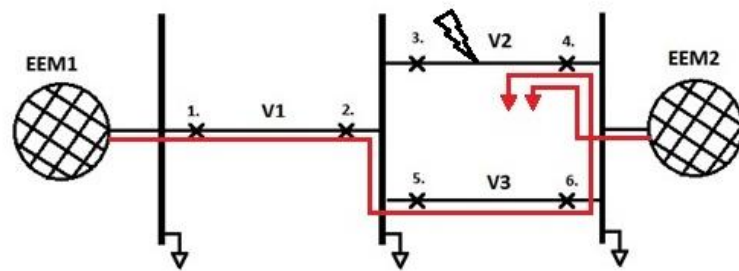
$$I_{3b} = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{x_{EEM2} + x_{V2}} = 1,896kA$$

$$I_{3a} > I_{3b}$$

$$S_{V2,3} = \sqrt{3}U_n I_{3a} = 637,689MVA$$

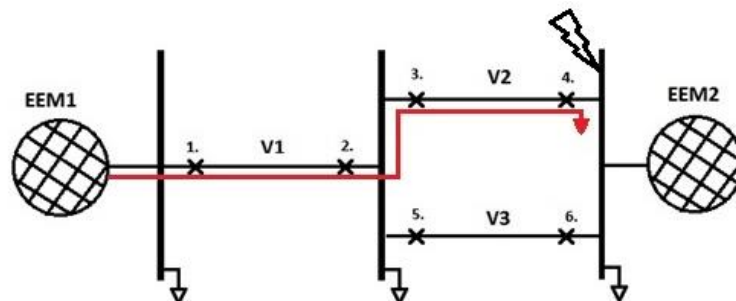
4.

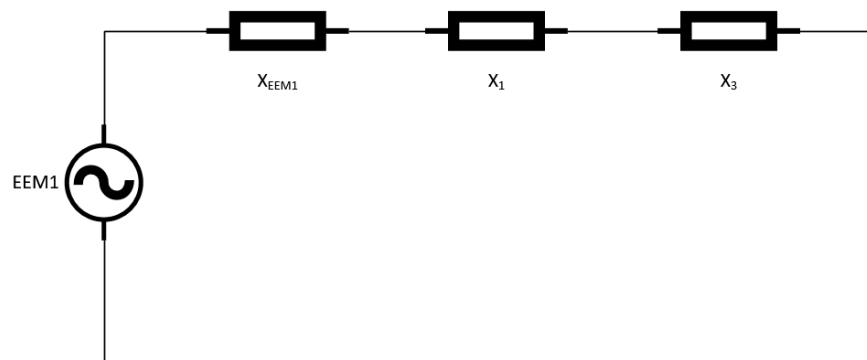
a) Kvar na vodu



$$I_{4a} = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{x_{EEM1} + X_{V1} + X_{V3}} + \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{X_{EEM2}} = 43,784kA$$

b) Kvar na sabirnici





$$I_{4b} = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}{x_{EEM1} + X_{V1} + X_{V3}} = 0,838kA$$

$$I_{4a} > I_{4b}$$

$$S_{V2,4} = \sqrt{3}U_n I_{4a} = 8341,972MVA$$

Vod V3 ima jednake vrijednosti kao i vod V2, pa su i rezultati jednaki.

Rješenja:

V1		
	I_a [kA]	I_b [kA]
1.	35,787	1,062
$S_{V1,1}$	6818,339 MVA	
2.	3,633	1,45
$S_{V1,2}$	692,179 MVA	
V2		
	I_a [kA]	I_b [kA]
3.	3,347	1,896
$S_{V2,3}$	637,689 MVA	
4.	43,784	0,838
$S_{V2,4}$	8341,972 MVA	
V3		
	I_a [kA]	I_b [kA]
5.	3,347	1,896
$S_{V3,5}$	637,689 MVA	
6.	43,784	0,838
$S_{V3,6}$	8341,972 MVA	

9. ZAKLJUČAK

Prekidači su relativno jednostavni elementi koji većinom rade na mehaničkom principu, a njihove mogućnosti uvelike olakšavaju normalno funkcioniranje mreže. U ovom radu objašnjena je razlika između prekidanja izmjenične i istosmjerne struje te su opisani problemi koji se pojavljuju u mrežama u trenutku prekida. Opisuje se pojava električnog luka te metode odnosno izvedbe prekidača koje pojednostavljaju njegovo gašenje. Navedeni su i opisani najkorišteniji mediji za prekidanje električnog luka. Na kraju teorijskog dijela je ukratko objašnjen princip izbora prekidača te princip sklapanja kondenzatorskih baterija i induktivnih trošila.

Računski dio rada je primjer proračuna struja kratkog spoja u krugu spojenom na dvije elektroenergetske mreže, s tri sabirnice te tri voda. Izračunate su struje kratkog spoja na sabirnicama i na vodovima te je vidljivo da su struje za vrijeme kratkog spoja na vodu uvijek veće. Pri odabiru prekidača potrebne su nam vrijednosti nazivnog napona, nazivne struje te nazivna prekidna moć. Budući da su se na vodovima pojavljivale veće struje koristili smo upravo te struje za izračun maksimalne snage. Izbor se vrši tako da se bira prekidač sa većom nazivnom snagom od snage dobivene izračunom što bi u ovom slučaju bio prekidač nazivne snage 10 000 MVA.

S napretkom tehnologije konstruiraju se sve složeniji prekidači sa sve boljim karakteristikama. Cilj je u potpunosti izbjeći probleme koji se javljaju u trenutku prekida, kao što su smetnje u mreži, gorenje luka ili moguća oštećenja na komponentama. Također je potrebno to izvesti što ekonomičnije, uz male gubitke te svesti prekidače na što manje dimenzije.

10. LITERATURA

- [1] Meštrović Krešimir: "Sklopni aparati srednjeg i visokog naopna", Graphis, Zagreb, srpanj 2007.
- [2] Roeper R.: "Short circuit currents in three phase systems", Berlin, 1985.
- [3] IEC Publication 62271-100 (2001): "High-voltage alternating-current circuit-breakers"
- [4] Flurschein C. H.: "Power circuit breaker – theory and design", Peter Peregrinus Ltd., 1982.
- [5] Markulin M, Miliša A., Štahan I.: "Razvoj i proizvodnja prekidača srednjeg napona u SOUR-u "Rade Končar", KONČAR, 1986.
- [6] Belin B.: "Uvod u teoriju električnih sklopnih aparata", Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [7] Štahan I., Naumovski I.: "Razvoj električnih sklopnih aparata sa gašenjem luka u vakuumu, KONČAR
- [8] 2. svibanj, 2016.
http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zee/nastava/svel/ep/download/ELEKTRICNA%20POSTROJENJA%206-p.pdf
- [9] 30. travanj, 2016.
https://library.e.abb.com/public/737de0b7f522f9b2c125728b00474780/75-78%201M720_ENG72dpi.pdf
- [10] 5. svibnja, 2016.
<http://ecmweb.com/content/how-perform-short-circuit-calculations>
- [11] Hrvoje Požar: "Visoko naponska rasklopna postrojenja", Tehnička knjiga, Zagreb, ožujak 1963.