

## Poglavlje 6

# Prekidanje struja kratkih spojeva

Prekidanje struja kratkih spojeva u elektroenergetskim mrežama predstavlja jedan od najtežih zadataka koji se postavlja pred rasklopnu opremu. Prilikom isključivanja kratkih spojeva pojavljuju se dva tipa naprezanja unutar prekidača.

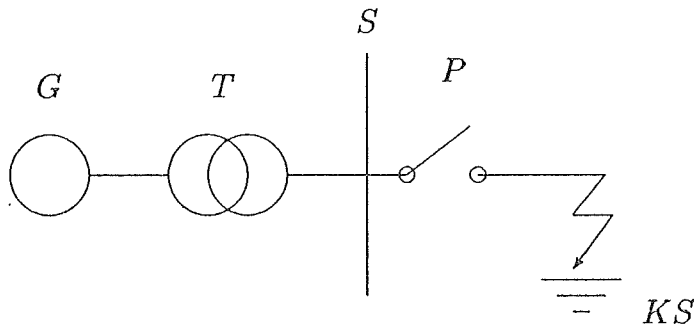
1. Za vreme gorenja luka između kontakata u procesu njihovog otvaranja javljaju se veoma jaka termička naprezanja kontakata, komore i medijuma za gašenje luka. Kod prekidača, kod kojih se razvijaju gasovi prilikom gorenja luka, javljaju se veoma visoki pritisci u komori za gašenje luka.
2. Posle gašenja luka dolazi do pojave napona između kontakata koji napreže dielektrik koji se još nije u potpunosti regenerisao. Ovaj napon u prelaznom režimu nazivamo **prelaznim povratnim naponom**, a u ustaljenom stanju ga nazivamo **povratnim naponom**.

Odmah nakon gašenja luka počinje uspostavljanje dielektrične izdržljivosti između kontakata. Brzina uspostavljanja dielektrične izdržljivosti zavisi od vrste medijuma za gašenje luka i od načina gašenja luka (da li je prekidač sa zavisnom ili nezavisnom karakteristikom). U svakom slučaju, uspostavljanje dielektrične izdržljivosti se odvija utoliko brže ukoliko se brže razmiču kontakti i intenzivnije uklanjaju jonizovani ostaci električnog luka.

Prikazani su prelazni povratni naponi za dva različita slučaja kratkih spojeva.

## 6.1 Sabirnički kratak spoj

Pod sabirničkim kratkim spojem se podrazumeva kratak spoj na odvodu neposredno iza sabirnica, kao na slici 6.1. Slika 6.1 odnosi se na kratak spoj u elektrani, iza bloka



Slika 6.1: Ekvivalentna šema za tumačenje pojava pri sabirničkom kratkom spoju

generator-transformator. Potpuno identične pojave bi se imale i kada bi napajanje sabirnica bilo iz sistema, koji se može ekvivalentirati izvorom koji se zamenjuje elektromotornom silom, unutrašnjom reaktansom i otpornikom koji modeluje sve elemente na kojima se pojavljuju gubici snage u sistemu.

Oznake na slici 6.1 imaju sledeće značenje:

$G$  -generator,

$T$  -transformator,

$S$  -sabirnice u postrojenju,

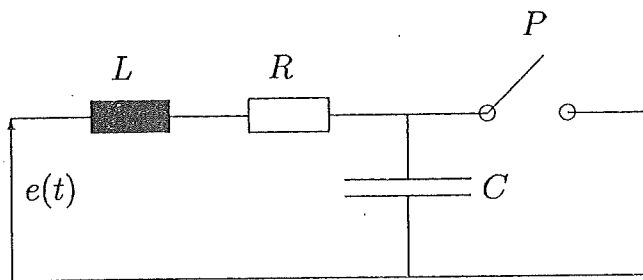
$P$  -prekidač koji isključuje kratak spoj,

$KS$  - kratak spoj neposredno uz prekidač.

Na slici 6.2 predstavljena je monofazna ekvivalentna šema za proračun prelaznog povratnog napona pri sabirničkom kratkom spoju. Pri analizi se smatra da je kratak spoj trofazni. Oznake na slici 6.2 imaju sledeće značenje:

$e(t)$  elektromotorna sila generatora ili ekvivalentna elektromotorna sila sistema, koja se menja po prostoperiodičnom zakonu:

$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (6.1)$$



Slika 6.2: Monofazna ekvivalentna šema za proračun prelaznog povratnog napona pri sabirničkom kratkom spoju

$E_m$  -temena fazna vrednost elektromotorne sile,

$\omega$  -indstrijska kružna učestanost,

$\varphi$  -početna faza u trenutku gašenja luka,

$L$  -ekvivalentna induktivnost sistema,

$R$  -ekvivalentni otpor sistema,

$C$  -ekvivalentni kapacitet sistema,

$P$  -prekidač.

Ako se zanemari uticaj otpora gubitaka u kolu  $R$  i otpora luka, tada se može smatrati da su struja kratkog spoja i elektromotorna sila fazno pomereni za  $\pi/2$ . Do gašenja luka pri isključenju kratkog spoja uvek dolazi u trenutku kada struja prolazi kroz nulu. Pri pojednostavljenoj analizi se pretpostavlja da je struja kratkog spoja prostoperiodična i da otpor električnog luka ne utiče na promenu njenog oblika. Zbog toga se može smatrati da je početna faza elektromotorne sile u trenutku gašenja luka  $\varphi = 0$ , pa se prelazni povratni napon počinje računati od tog trenutka kao referentnog.

Diferencijalna jednačina koja opisuje režim u kolu na slici 6.2 ima sledeći oblik:

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri + u_c = e(t) \quad (6.2)$$

gde je:

$$i = C \frac{\partial u_c}{\partial t} \quad (6.3)$$

Zamenom izraza 6.3 u 6.2 se dobija parcijalna diferencijalna jednačina drugog reda sledećeg oblika:

$$LC \frac{\partial^2 u_c}{\partial t^2} + RC \frac{\partial u_c}{\partial t} + U_c = e(t) \quad (6.4)$$

Za trenutak  $t = 0$  važe sledeći početni uslovi:

1.  $i_{t=0} = 0$  jer se jedino pri prolasku struje kroz nulu može ugaziti električni luk,
2.  $u_{c_{t=0}} = 0$  jer je zanemaren pad napona na luku, pa je napon na kondenzatoru  $C$  sve do trenutka gašenja luka jednak nuli.

Kada se parcijalna diferencijalna jednačina reši, uz određena uprošćenja, vremenska promena napona na kondenzatoru  $C$  ima sledeći analitički oblik:

$$u_c(t) = k_f E_m \cos(\omega t) - k_f E_m \cos(\alpha \omega_1 t) e^{-\delta t} \quad (6.5)$$

gde je:

$$k_f = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2} \quad (6.6)$$

Oznake u izrazu 6.5 imaju sledeće značenje:

$k_f$  – koeficijent Ferantijevog efekta, usled proticanja kapacitivne struje kroz induktivitete. U slučaju kada se analiziraju prelazni povratni naponi pri isključivanju struja kratkih spojeva uvek je  $k_f = 1$  jer je  $\omega_1 \gg \omega$ .

$\omega_1$  – slobodna kružna učestanost idealnog kolã bez gubitaka,

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6.7)$$

$\alpha$  – koeficijent promene slobodne učestanosti usled dejstva gubitaka,

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega_1^2}} \quad (6.8)$$

Koeficijent  $\alpha$  je nešto manji od 1, ali je veoma blizak jedinici.

$\delta$  – koeficijent prigušenja,

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (6.9)$$

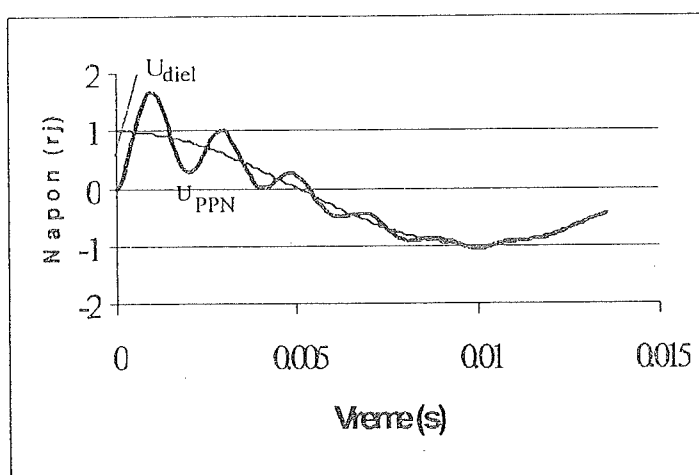
Kod isključivanja struja kratkih spojeva ispunjen je uslov:

$$\begin{aligned} \delta &\ll \omega_1 \\ \frac{\omega}{\omega_1} &\ll 1 \end{aligned} \quad (6.10)$$

Vremenska promena napona na kondenzatoru ujedno predstavlja i vremensku promenu napona izmedju kontakata prekidača, jer je kontakt prekidača sa strane voda direktno vezan za zemlju u slučaju metalnog kratkog spoja. Vremenska promena napona na kondenzatoru ima isti vremenski oblik kao i u slučaju uključenja voda u praznom hodu, stin što postoje dve bitne razlike:

1. Slobodna učestanost prelaznog napona  $\omega_1$  je mnogo viša u slučaju isključenja kratkog spoja nego u slučaju uključenja voda u praznom hodu zbog malog kapaciteta sabirnica  $C$  koji figurira u ekvivalentnoj šemi,
2. Za razliku od slučajnog trenutka uključenja prekidača kod uključenja voda u praznom hodu, kod isključenja kratkog spoja trenutak gašenja luka je determinisan prolaskom struje prekidača kroz nulu.

Na slici 6.3 prikazana je vremenska promena napona u slučaju isključenja sabirničkog kratkog spoja. Oznake na slici imaju sledeće značenje:



Slika 6.3: Vremenska promena prelaznog povratnog napona pri sabirničkom kratkom spoju

$U_{PPN}$  –predstavlja prelazni povratni napon,

$U_{diel}$  –predstavlja podnosivi napon koji se uspostavlja u medjukontaktom razmaku (dielektrična izdržljivost medjukontaktnog razmaka).

U trenutku gašenja električnog luka već postoji određeni podnosivi napon medjukontaktnog razmaka (jer je prostor već delimično dejonizovan). Podnosivi napon medjukontaktnog razmaka raste velikom brzinom zbog intenzivne dejonizacije prostora i zbog razmičanja kontakata.

Kada ne bi bilo prigušenja, mogla bi se postići teorijska amplituda prelaznog povratnog napona od  $2E_m$ . Zbog značajnog uticaja prigušenja realna maksimalna vrednost prelaznog povratnog napona se kreće u granicama 1,3 do 1,6  $E_m$ . Odnos amplitude prelaznog povratnog napona i temene vrednosti napona koja bi vladala na istom mestu u mreži na kome je određen prenapon naziva se **faktorom prenapona**.

Prilikom isključivanja struja kratkih spojeva prenaponi koji se pojavljuju u mreži nisu opasni za izolaciju elemenata mreže. Oni su opasni jedino za medjukontaktni razmak sklopnog aparata u kome se tek odvija uspostavljanje dielektrične izdržljivosti. Pošto se pojavljuje sa jedne strane prelazni povratni napon izazvan odzivom mreže, koji napreže medjukontaktni prostor, a sa druge strane se uspostavlja dielektrična izdržljivost prostora između kontakata, veoma je važan oblik i strmina uspostavljanja prelaznog povratnog napona.

Razlikujemo sledeće delove povratnog napona:

- početni prelazni povratni napon  $U_{PPP}$  koji nastupa neposredno posle gašenja luka, u samoj okolini nule struje,
- prelazni povratni napon  $U_{PPN}$  predstavlja napon između kontakata u prelaznom režimu,
- povratni napon  $U_{PN}$  predstavlja napon između otvorenih kontakata sklopnog aparata u ustaljenom stanju.

Posebno važni detalji vezani za povratni napon su:

- početna strmina prelaznog povratnog napona, koja će biti obeležena sa  $S_{PPP}$ , a koja nastupa odmah posle gašenja luka,
- srednja strmina prelaznog povratnog napona  $S_{sr}$ , koja vlada do prvog maksimuma prelaznog povratnog napona,

- vreme do prvog maksimuma prelaznog povratnog napona, koje iznosi:

$$t_M = \frac{\pi}{\omega_1} \quad (6.11)$$

Srednja strmina prelaznog povratnog napona se može izračunati na osnovu vremena do prvog maksimuma i vrednosti napona u prvom maksimumu.

$$s_{sr} = \frac{U_{Max1}}{t_M} \quad (6.12)$$

odnosno:

$$s_{sr} = \frac{U_{Max1}\omega_1}{\pi} \quad (6.13)$$

Teorijska srednja strmina prelaznog povratnog napona, uz zanemareno prigušenje prelaznog povratnog napona je:

$$s_{sr} = \frac{2E_m\omega_1}{\pi} \quad (6.14)$$

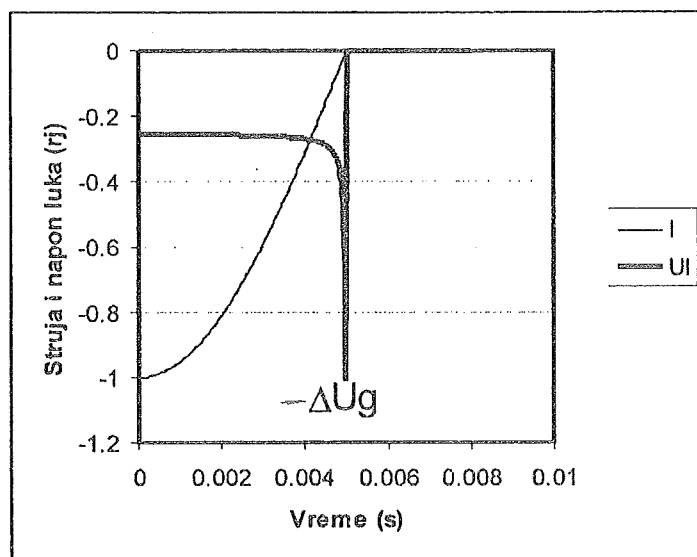
Realna srednja strmina je znatno manja zbog uticaja prigušenja. Početna strmina izračunata iz izraza 6.5 je jednaka nuli, jer je  $\partial u_c / \partial t_{t=0} = 0$ .

### 6.1.1 Uticaj napona luka na oblik prelaznog povratnog napona

Analitički izraz za procenu talasnog oblika prelaznog povratnog napona izmedju kontakata prekidača odnosi se na odziv mreže pri prekidanju struje, uz potpuno zanemarenje uticaja procesa u samom prekidaču. U toku razmicanja kontakata, za vreme gorenja luka u prekidaču, javlja se napon luka, koji u trenutku neposredno pre gašenja ima vrednost  $\Delta U_G$ . Na slici 6.4 prikazan je oblik napona na luku u toku trajanja struje kratkog spoja, odakle se vidi da u trenutku gašenja luka napon ima maksimalnu vrednost  $\Delta U_G$ . U tom slučaju, prilikom rešavanja prelaznog procesa u jednostavnoj šemi na slici 6.2 mora se uvažiti da napon na kondenzatoru  $C$  u trenutku  $t = 0$  ima vrednost  $u_c(0) = \Delta U_G$ , što predstavlja početni uslov za rešavanje diferencijalne jednačine 6.4. Kada se reši diferencijalna jednačina 6.4, uvažavajući da napon na kondenzatoru  $C$  ima vrednost  $\Delta U_G$  u trenutku kada je struja kroz kolo jednaka nuli, tada se dobija sledeći analitički izraz za vremensku promenu napona na kondenzatoru  $C$ , što ujedno predstavlja i vremensku promenu napona izmedju kontakata prekidača:

$$u_c(t) = k_f E_m \cos(\omega t) - (k_f E_m + \Delta U_G) \cos(\alpha \omega_1 t) e^{-\delta t} \quad (6.15)$$

Vremenska promena napona prikazana je u ovom slučaju na slici 6.5.



Slika 6.4: Vremenska promena napona luka izmedju kontakata prekidača pri kratkom spoju ( $\Delta U$ -napon gašenja luka)

Kada se pri proračunu prelaznog povratnog napona izmedju kontakata prekidača uvažava vrednost napona luka u trenutku gašenja, dobija se viša maksimalna vrednost prelaznog povratnog napona nego kada se zanemaruje uticaj luka. Maksimalna vrednost prelaznog povratnog napona je:

$$U_{PPN_{Max}} = (E_m + \Delta U_g)e^{-\delta t_m} + E_m \quad (6.16)$$

U izrazu 6.16 zanemaren je uticaj Ferantijevog efekta na povećanje napona na sabirnicama usled proticanja kapacitivne struje kroz induktivitet izvora. U gornjem izrazu  $t_m$  predstavlja trenutak pojave maksimalnog napona:

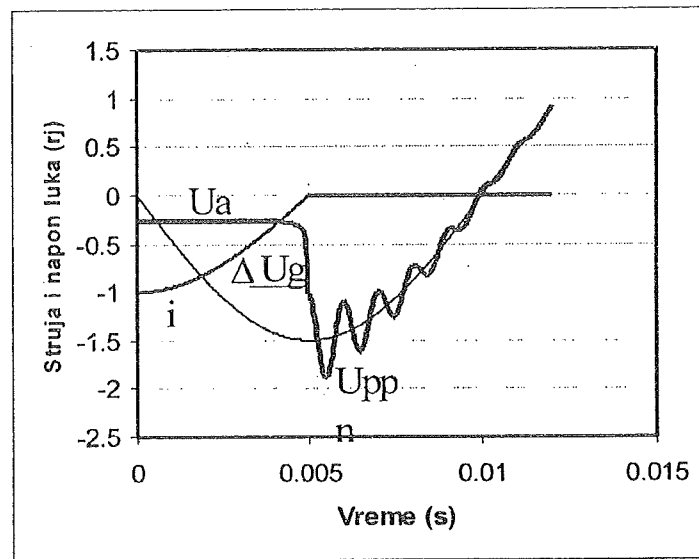
$$t_m = \frac{\pi}{\omega_1} \quad (6.17)$$

U izrazu 6.17 zanemaren je uticaj otpornosti u kolu na promenu sopstvene učestanosti prelaznog povratnog napona  $\omega_1$ , jer je taj uticaj potpuno zanemarljiv. Čak i kada se uvažava uticaj pada napona na luku u trenutku njegovog gašenja, faktor prenapona se kreće u granicama 1,3 do 1,6.

### 6.1.2 Složeniji oblici prelaznog povratnog napona pri sabirničkom kratkom spoju

Na slici 6.1 prikazana je zamenska šema u slučaju kratkog spoja uz prekidač pri elektrani ili blizu jakog čvorišta, kada na sabirnicama nije priključen nijedan drugi vod. U praksi se



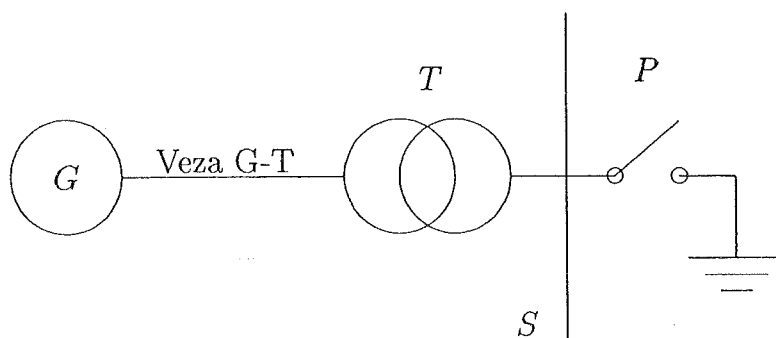


Slika 6.5: Vremenska promena prelaznog povratnog napona pri sabirničkom kratkom spoju uz uvažavanje uticaja napona luka u trenutku njegovog gašenja

pojavljuju slučajevi koji daju složenije oblike prelaznog povratnog napona pri isključivanju kratkih spojeva neposredno uz priključke prekidača.

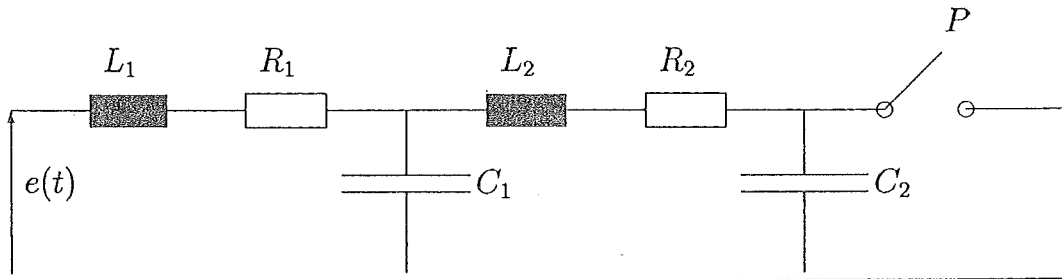
### Isključivanje kratkog spoja u dvofrekventnoj šemi

U velikom broju slučajeva, posebno u jakim mrežama napona iznad  $110kV$ , u prelaznom povratnom naponu se pojavljuju dve različite slobodne učestanosti. Šema na kojoj će to biti ilustrovano odnosi se na slučaj kada se isključuje kratak spoj na početku visokonaponskog voda uz elektranu kod koje postoji značajan kapacitet veze između generatora i niženaponske strane transformatora. Na slici 6.6 prikazana je šema sistema, a na slici



Slika 6.6: Isključenje kratkog spoja uz postrojenje elektrane

6.7 prikazana je dvofrekventna zamenska šema za proračun prelaznog povratnog napona koja odgovara prethodnoj monofaznoj ekvivalentnoj šemi sistema. Oznake na slici 6.7



Slika 6.7: Monofazna ekvivalentna šema za proračun pri isključenju kratkog spoja uz postrojenje elektrane

imaju sledeće značenje:

$e(t)$  -elektromotorna sila generatora,

$L_1$  -subtranzijentna induktivnost generatora,

$R_1$  -otpor koji modeluje sve gubitke u namotaju generatora,

$C_1$  -kapacitivnost generatora i kapacitivnost veza generator-transformator,

$L_2$  -induktivnost rasipanja transformatora,

$R_2$  -otpor usled gubitaka u transformatoru,

$C_2$  -kapacitet sabirnica,

$P$  - prekidač koji prekida struju kratkog spoja, neposredno iza njegovih priključaka.

Približni izraz za talasni oblik napona na kondenzatoru  $C_2$  koji ujedno predstavlja i talasni oblik prelaznog povratnog napona, dat je izrazom u kome figurišu dve slobodne učestanosti koje se prigušuju različitim brzinama [27]:

$$u_c = E_m \cos(\omega t) + E_m \frac{1}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \left[ \omega_2^2 \cos(\omega_1 t) e^{-\delta_1 t} - \omega_1^2 \cos(\omega_2 t) e^{-\delta_2 t} \right] \quad (6.18)$$

Oznake u izrazu 6.18 imaju sledeće značenje:

$\omega_1$  - prva sopstvena učestanost kola

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (6.19)$$

$\omega_2$  - druga sopstvena učestanost kola

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (6.20)$$

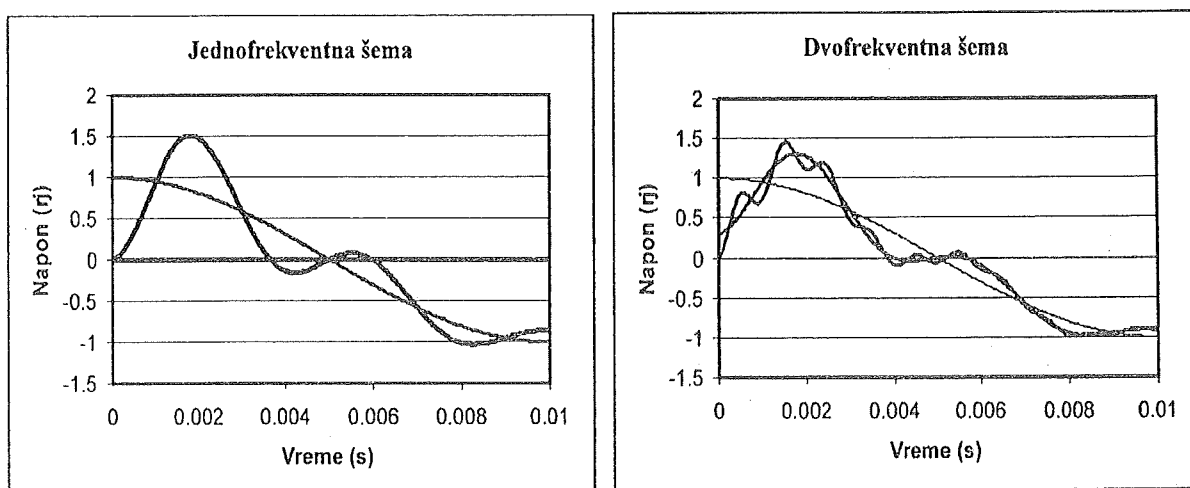
$\delta_1$  - prigušenje prve konture kola

$$\delta_1 = \frac{R_1}{2L_1} \quad (6.21)$$

$\delta_2$  - prigušenje druge konture kola

$$\delta_2 = \frac{R_2}{2L_2} \quad (6.22)$$

Talasni oblik napona prikazan je na slici 6.8 u jednofrekventnoj šemi levo, a u dvofrekventnoj šemi desno. Oblik napona u jednofrekventnoj šemi sa slike 6.8 levo dobijen je na osnovu analitičkog izraza 6.5.



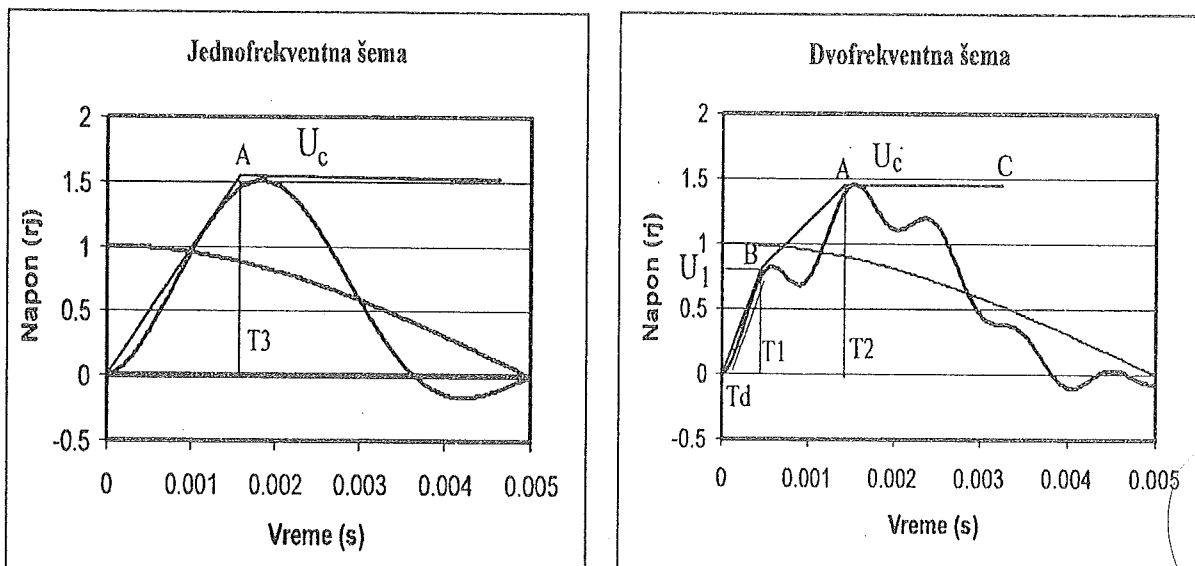
Slika 6.8: Talasni oblik prelaznog povratnog napona nastalog u dvofrekventnoj šemi (desno) i u jednofrekventnoj šemi (levo)

Može se uočiti da u dvofrekventnoj šemi može da dodje do značajnog porasta početne strmine prelaznog povratnog napona u odnosu na jednofrekventnu šemu. Oblik prelaznog povratnog napona zavisi najviše od odnosa učestanosti  $\omega_1$  i  $\omega_2$ , a manjim delom od prigušenja prelaznog režima.

Pored početne strmine prelaznog povratnog napona, druga važna karakteristika oblika prelaznog povratnog napona je kašnjenje nastanka strmog porasta prelaznog povratnog napona.

Propisima se definišu pojedine karakteristike prelaznog povratnog napona [28], da bi se omogućilo da se pri ispitivanju mogu primenjivati standardni oblici prelaznog povratnog napona koji naprežu prekidač. Umesto da se definiše oblik prelaznog povratnog napona, definiše se obvojnica krive prelaznog povratnog napona. U slučaju jednofrekventne šeme obvojnica krive prelaznog povratnog napona se može predstaviti sa samo dve prave, a u slučaju dvofrekventne šeme se definiše sa 3 prave. U slučaju kada je obvojnica opisana sa samo dve prave, definiše se sa dva parametra (maksimalni napon  $U_c$  i trenutak preseka prve i druge prave  $T_3$ ). U slučaju obvojnice koja se sastoji od tri prave, obvojnica definiše četiri parametra. To su napon  $U_1$ , trenutak preseka prve i druge prave  $T_1$ , napon  $U_c$  i trenutak preseka druge i treće prave  $T_2$ . Prave treba da se tako nacrtaju da što vernije prate oblik stvarnog prelaznog povratnog napona.

Na slici 6.9 prikazane su obvojnice prelaznog povratnog napona definisane sa dva parametra (levo) i sa 4 parametra (desno). Na slici 6.9 oznake imaju sledeće značenje:



Slika 6.9: Obvojnice krivih prelaznih povratnih napona u dvofrekventnoj šemi (desno) i u jednofrekventnoj šemi (levo)

A, B i C -tačke koje definišu preseke pravih koje čine obvojnica krive prelaznog povratnog napona

obvojnica prelaznog povratnog napona -skup pravih linija koje dodiruju krivu prelaznog povratnog napona i time definišu njen oblik. Kriva prelaznog povratnog napona pri ispitivanju mora da dodiruje obvojnica. Ako kriva prelaznog povratnog napona preseče obvojnica, ispitivanja se odvijaju pri težim uslovima od propisanih,

a ako je uopšte ne dodiruje, tada se ispitivanja odvijaju pri uslovima koji su blaži od propisanih.

**linija kašnjenja** - linija paralelna sa pravom iz obvojnice prelaznog povratnog napona koja polazi iz koordinatnog početka. Linija kašnjenja je pomerenjena u odnosu na koordinatni početak za vreme kašnjenja  $T_d$ . Ova linija se nalazi ispod krive prelaznog povratnog napona, dodiruje je sa donje strane, a ne sme da je preseče.

$T_d$  - vreme kašnjenja, odsečak na vremenskoj osi koji pravi linija kašnjenja,

$T_1$  - vreme do preseka prve i druge prave obvojnice prelaznog povratnog napona,

$T_2$  - vreme do preseka druge i treće prave obvojnice prelaznog povratnog napona,

$T_3$  - Vreme do preseka prve i druge prave u slučaju obvojnice prelaznog povratnog napona definisane sa dva parametra.

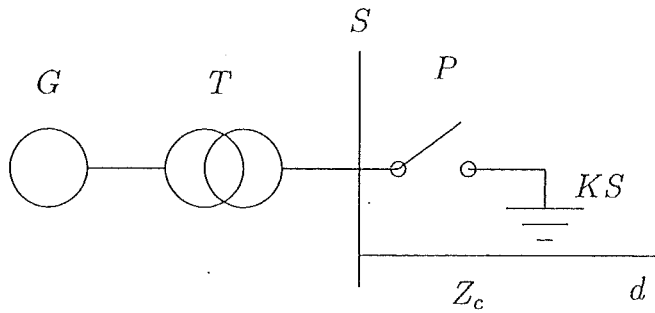
Pri eksperimentalnom odredjivanju prelaznog povratnog napona razlikujemo dva pojma:

- **Očekivani prelazni povratni napon** je prelazni povratni napon koji je posledica dejstva samo kola koje se isključuje, na koji ne utiče sklopni aparat koji prekida struju. To znači da je očekivani prelazni povratni napon odredjen bez uticaja napona luka u trenutku gašenja, kao i ostalih mogućih uticaja sklopnog aparata na prelazni povratni napon.
- **Prelazni povratni napon** se pojavljuje u mreži u normalnim uslovima i obuhvata uticaj sklopnog aparata koji je prekinuo struju.

### Isključenje sabirničkog kratkog spoja u šemi sa više vodova priključenih na sabirnice

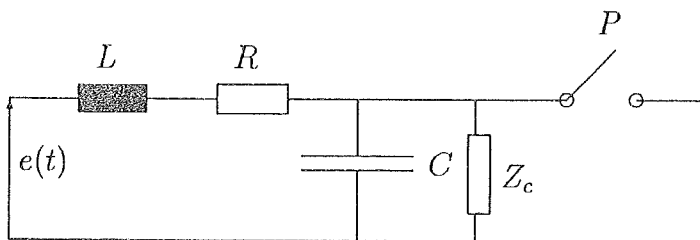
Ukoliko se na sabirnicama postrojenja nalazi priključen veći broj vodova, a ne samo vod na kome se dogodio kratak spoj, tada se pojavljuju odredjene specifičnosti u obliku prelaznog povratnog napona koje mogu da dovedu do većih naprezanja nego u slučaju sabirničkog kratkog spoja u jednofrekventnoj šemi.

Na slici 6.10 prikazana je jednopolna šema sistema u kome se posmatra proces isključenja kratkog spoja. Sa  $Z_c$  označena je karakteristična impedansa priključenog voda, a sa  $d$  njegova dužina.



Slika 6.10: Monofazna zamenska šema sistema u kome se razmatra troljni sabirnički kratak spoj sa još jednim vodom priključenim na sabirnice

Na slici 6.11 prikazana je ekvivalentna šema u kojoj se vrši proračun prelaznog režima pri isključenju kratkog spoja za vreme dok se ne pojavljuje reflektovani talas od drugog kraja voda priključenog na sabirnice.



Slika 6.11: Monofazna zamenska šema za proračun prelaznog povratnog napona u sistemu sa još jednim vodom priključenim na sabirnice

Šema na slici 6.11 nacrtana je na osnovu Petersenovog pravila po kome se dugački vodovi mogu zameniti koncentrisanim omskim otporima za vreme dok se ne pojavi odbijeni talas sa drugog kraja voda. Na osnovu šeme sa slike 6.11 može se napisati sledeći sistem diferencijalnih jednačina na osnovu zamenske šeme sa slike 6.11:

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri + u_c = e(t) \quad (6.23)$$

$$i_r = \frac{u_c}{Z_c} \quad (6.24)$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (6.25)$$

$$i = i_r + i_c \quad (6.26)$$

Posle zamene 6.26, 6.25 i 6.24 u 6.23, nakon sredjivanja se dobija diferencijalna jednačina drugog reda sledećeg oblika:

$$LC \frac{\partial^2 u_c}{\partial t^2} + \left( RC + \frac{L}{Z_c} \right) \frac{\partial u_c}{\partial t} + \left( \frac{R}{Z_c} + 1 \right) u_c = e(t) \quad (6.27)$$

Rešenje diferencijalne jednačine 6.27 biće određeno za nulte početne uslove, što znači da je zanemaren napon na kondenzatoru  $C$  u trenutku gašenja luka.

Rešenje diferencijalne jednačine 6.27 može biti periodično ili aperiodično. Ako je ispunjen uslov:

$$\frac{1}{4} \left( RC + \frac{L}{Z_c} \right)^2 > LC \left( \frac{R}{Z_c} + 1 \right) \quad (6.28)$$

proces je aperiodičan. Ako je ispunjen uslov:

$$\frac{1}{4} \left( RC + \frac{L}{Z_c} \right)^2 < LC \left( \frac{R}{Z_c} + 1 \right) \quad (6.29)$$

proces je periodičan. U slučaju kada je rešenje jednačine 6.27 periodično, tok prelaznog procesa je oscilatorno prigušen i sveo bi se na znatno prigušeniji jednofrekventni proces do pojave reflektovanog talasa sa drugog kraja voda.

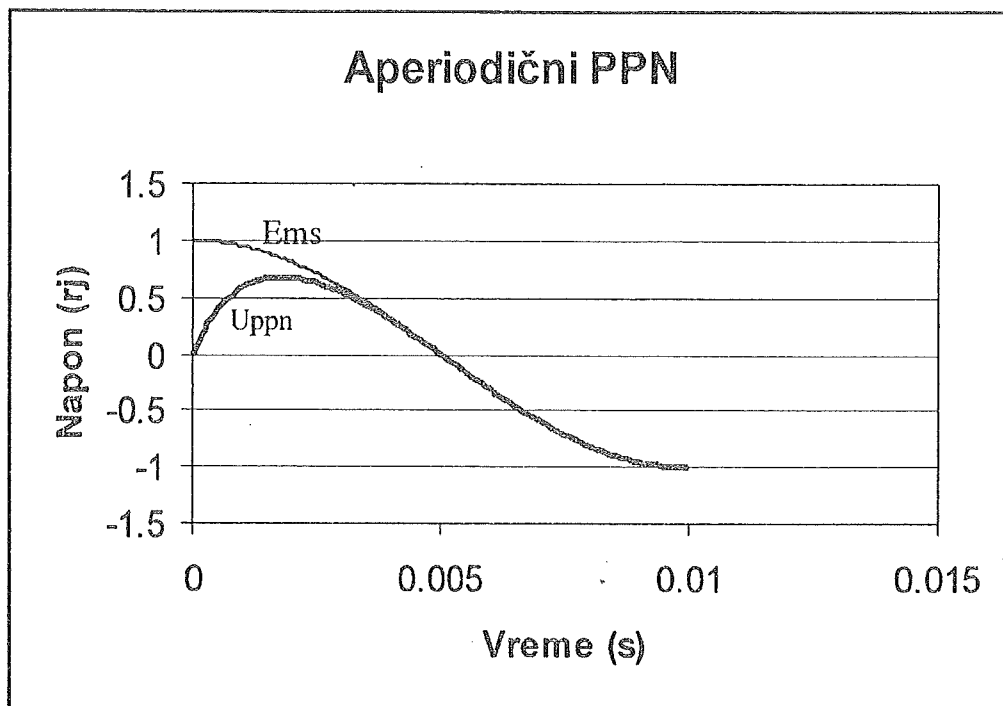
U slučaju kada je proces aperiodičan, početni deo prelaznog povratnog napona ima izgled kao na slici 6.12. Sa slike 6.12 može se uočiti značajna strmina početnog dela prelaznog povratnog napona. Strmina je veća nego kod sabirničkog kratkog spoja sa oscilatornim oblikom prelaznog povratnog napona, kod koga postoji kašnjenje  $T_d$  porasta prelaznog povratnog napona, koje se opisuje linijom kašnjenja.

Posle dvostrukog vremena prostiranja po vodu pojavio bi se reflektovani talas koji bi izazvao ponovno povećanje prelaznog povratnog napona. Za ovaj slučaj je karakteristična velika strmina početnog dela prelaznog povratnog napona.

Odnos parametara ekvivalentne zamenske šeme sa slike 6.11 je takav da omski otpor paralelan kapacitetu sabirnica  $C$  ima tako veliku vrednost da čini proces aperiodičnim, što izaziva porast strmine početnog dela prelaznog povratnog napona.

Oblik prelaznog povratnog napona u slučaju kada se posmatra duži vremenski period za slučaj sabirničkog kratkog spoja sa većim brojem priključenih vodova, prikazan je na slici 6.13

Na slici 6.13 se može uočiti da je oblik talasa prelaznog povratnog napona sa većim brojem viših slobodnih učestanosti koje se prigušuju, ali je početna strmina prelaznog povratnog napona velika. U prethodnim primerima je zanemaren uticaj napona gašenja luka na oblik prelaznog povratnog napona.



Slika 6.12: Početni prelazni povratni napon u slučaju sabirničkog kratkog spoja sa većim brojem uključenih vodova na sabirnice

## 6.2 Blizak kratak spoj

Pod bliskim kratkim spojem ili kilometarskim kvarom se podrazumeva kratak spoj koji se dogodio na vodu na nekoliko stotina metara ili nekoliko kilometara daleko od priključaka prekidača koji kvar isključuje. Posle gašenja luka nastaje prelazni proces na isključenom delu voda i sa napojne strane prekidača. Razlika napona pri prelaznom procesu sa napojne strane prekidača i sa strane voda grade prelazni povratni napon, koji napreže medjukontakti prostor prekidača. Tipična monofazna zamenska šema za analizu pojava pri isključenju bliskog kratkog spoja prikazana je na slici 6.14.

Šema na slici 6.14 se odnosi na slučaj kada se kratak spoj dogodio u blizini elektrane. Oznake na slici imaju sledeće značenje:

$G$  -generator,

$T$  -transformator,

$S$  -sabirnice,