

Poglavlje 7

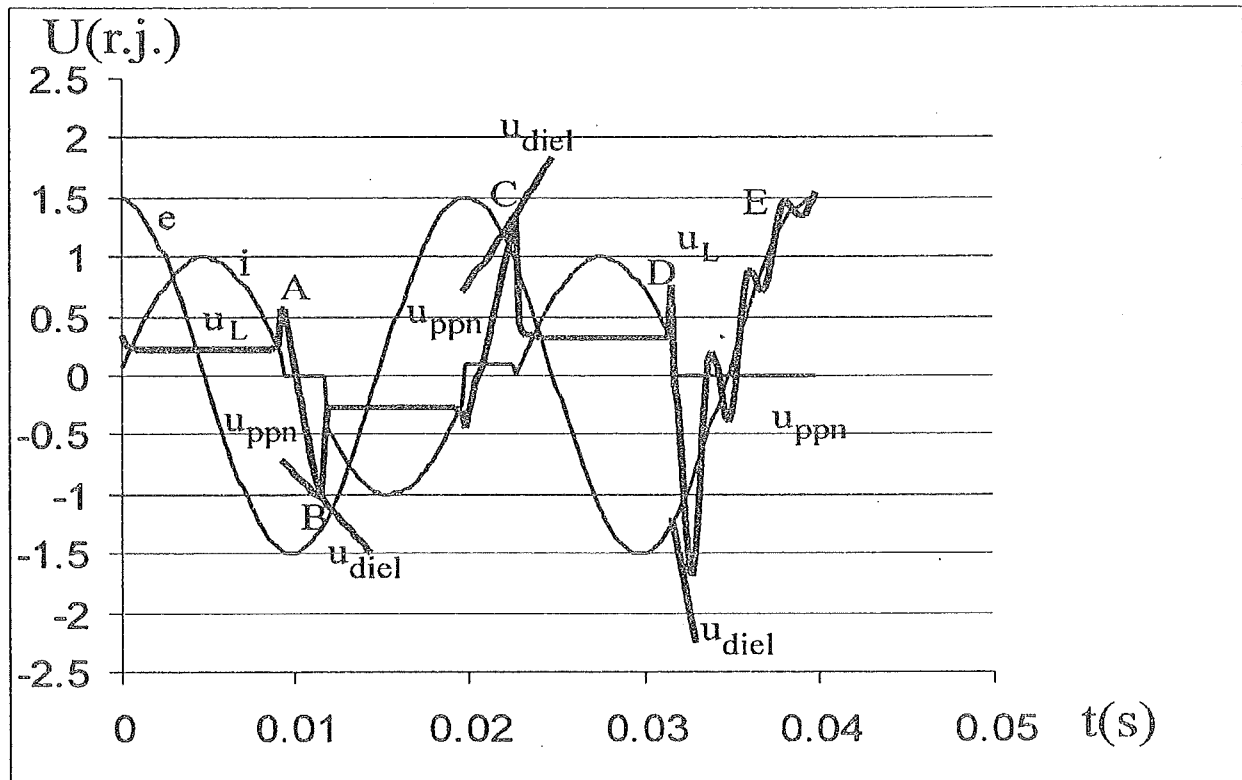
Naprezanja prekidača posle gašenja luka

Za vreme trajanja kratkog spoja dolazi do intenzivnog termičkog naprezanja komore za gašenje luka i kontakata. Osim toga, mogu se pojaviti značajna mehanička naprezanja zbog delovanja visokog pritiska u komori za gašenje luka i delovanja mehanizma za pokretanje kontakata. Međutim, nakon gašenja luka javljaju se velika naprezanja dielektrika u medjukontaktom razmaku koja će na ovom mestu da budu objašnjena.

7.1 Ponovna paljenja luka u medjukontaktom prostoru

U trenutku gašenja električnog luka, koje nastupa pri isključivanju velikih struja kao što su struje kratkih spojeva, pri prolazu struje kroz nulu već postoji izvesna dielektrična čvrstoća prostora između kontakata, jer je prostor najvećim delom dejonizovan, a temperatura je opala ispod 2000 K, pa je uticaj termičke jonizacije vrlo mali. Sa druge strane, odmah posle gašenja luka uspostavlja se prelazni povratni napon, koje je posledica odziva mreže na prekidanje struje. Ukoliko prelazni povratni napon postane veći od uspostavljene dielektrične izdržljivosti između kontakata, nastaje ponovni proboj. Zbog toga je veoma važno da se dielektrična izdržljivost uspostavlja brže od prelaznog povratnog napona. Međutim, u toku razdvajanja kontakata, kada su razmaci između kontakata još uvek nedovoljni, dielektrična izdržljivost se sporije uspostavlja nego prelazni povratni naponi i može da dodje do ponovnog paljenja luka. Kada do ponovnog paljenja luka dolazi zbog toga što je napon između kontakata viši od dielektrične izdržljivosti med-

jukontaktne prostora, tada tu pojavu nazivamo dielektričkim probojem. Prelazni povratni napon i dielektrična izdržljivost između kontakata se utrkuju, pa teorija koja tumači ponovna paljenja luka na ovaj način naziva se teorija trke [30]. Ona omogućava tumačenje načina gašenja luka u kolima naizmenične struje [33]. Za vreme proticanja struje kratkog spoja i_{ks} kroz kolo javlja se pad napona na luku u_L . Na slici 7.1 tačka A



Slika 7.1: Vremenski tok napona i struja pri prekidanju struje kratkog spoja

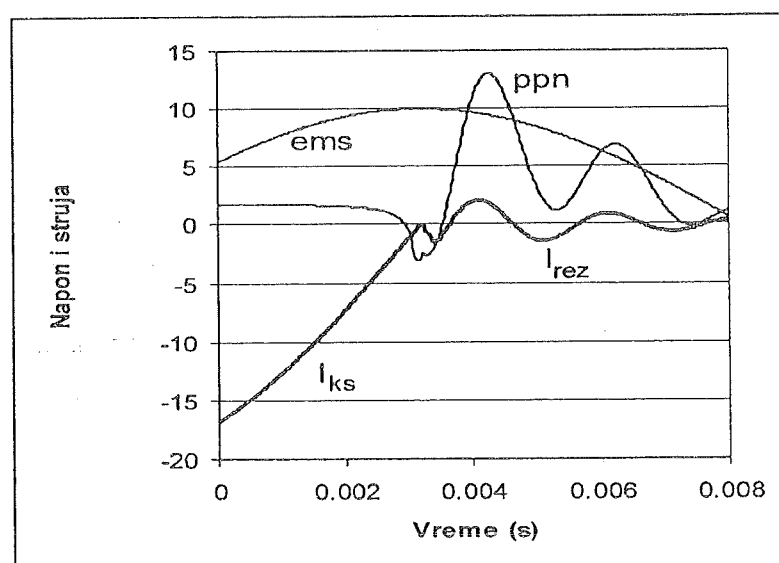
označava trenutak prvog gašenja luka u trenutku prolaska struje kroz nulu. Pad napona na luku je u tom trenutku maksimalan, struja prolazi kroz nulu, a od tačke A počinje uspostavljanje prelaznog povratnog napona u_{ppn} . U trenutku gašenja luka već postoji uspostavljena određena dielektrične izdržljivosti medjukontaktne prostora, koja nastavlja da raste. Dielektrična izdržljivost prostora između kontakata obeležena je sa u_{diel} . U tački B prelazni povratni napon u_{ppn} postaje viši od dielektrične izdržljivosti, pa dolazi do ponovnog paljenja luka i uspostavljanja struje kratkog spoja. Napon između kontakata opada sa vrednosti prelaznog povratnog napona na napon luka. Pri sledećem prolasku struje kroz nulu napon na luku postaje maksimalan i dolazi do gašenja luka i prekida struje kratkog spoja (tačka C na dijagramu). Uspostavlja se prelazni povratni napon u_{ppn} koji raste sve do trenutka dok ne poraste iznad krive dielektrične izdržljivosti u_{diel} , što se događa u tački D na dijagramu. Ponovo se uspostavlja struja, a između kontakata vlada napon luka u_L . U tački E dolazi do prolaska struje kroz nulu, gašenja luka i uspostavl-

janja dielektrične izdržljivosti. Prelazni povratni napon između kontakata raste, ali zbog dovoljno velikog razmaka i dejonizovanosti prostora je manji od dielektrične izdržljivosti i zbog toga dolazi do trajnog gašenja luka. Teorijom trke se može objasniti postojanje bezstrujne pauze nakon gašenja luka, a pre njegovog ponovnog paljenja.

7.2 Termički proboj

Teorija trke je gruba aproksimacija pojava koje se događaju neposredno nakon gašenja luka i koje prouzrokuju njegovo ponovno paljenje. Osnovna pretpostavka kod teorije trke je da je provodnost prostora posle prekida struje zanemarljivo mala, a da ponovno paljenje luka nastaje trenutnim probijem i uspostavljanjem velike provodnosti prostora između kontakata. Pojave u realnosti su znatno složenije. Nakon gašenja luka je još uvek prostor između kontakata delimično jonizovan i zagrejan na 1000-2000 K. Taj zagrejan prostor naziva se **preostali stub luka** ili rezidualni stub luka. Kroz njega protiče vrlo mala struja, reda 10 – 100 mA, koju nazivamo **preostala** ili rezidualna struja luka. Proces proticanja preostale struje luka traje od nekoliko μs do oko $1000\mu s$, što zavisi od tipa prekidača i načina gašenja luka, kao i od vrste sklopne operacije. Fizički procesi u okolini nule struje nisu još u potpunosti proučeni, jer je njihova eksperimentalna provera izuzetno složena.

Na slici 7.2 prikazani su vremenski tokovi struja i napona pri uspešnom prekidanju kratkog spoja, uz prikaz preostale struje luka. Na slici 7.2 oznake imaju sledeće značenje:



Slika 7.2: Dijagram napona i struja u blizini prolaska struje kroz nulu

ems –elektromotorna sila,

ppn –prelazni povratni napon,

i_{ks} –struja kratkog spoja,

i_{rez} –rezidualna struja luka.

Sa slike 7.2 se može uočiti da rezidualna struja, koja protiče pod dejstvom prelaznog povratnog napona, prati oblik prelaznog povratnog napona. Rezidualna struja se može odrediti iz izraza:

$$i_{rez}(t) = \frac{u_{ppn}^2(t)}{R_{rez}(t)} \quad (7.1)$$

gde su:

$i_{rez}(t)$ –vremenski tok preostale struje,

$u_{ppn}(t)$ –vremenski tok prelaznog povratnog napona,

$R_{rez}(t)$ –vremenski tok otpornosti preostalog stuba luka.

Preostala struja luka ima omski karakter, za razliku od struje kratkog spoja koja ima induktivni karakter. Struja kratkog spoja je ograničena impedansom mreže, a struja preostale struje luka je ograničena otporom preostalog stuba luka. Proticanje struje kroz preostali stub luka izaziva njegovo zagrevanje. Toplotna snaga koja se oslobadja na preostalom stubu luka usled proticanje struje kroz njega može se izraziti na sledeći način:

$$P_{rez} = \frac{u_{ppn}(t)^2}{R_{rez}(t)} \quad (7.2)$$

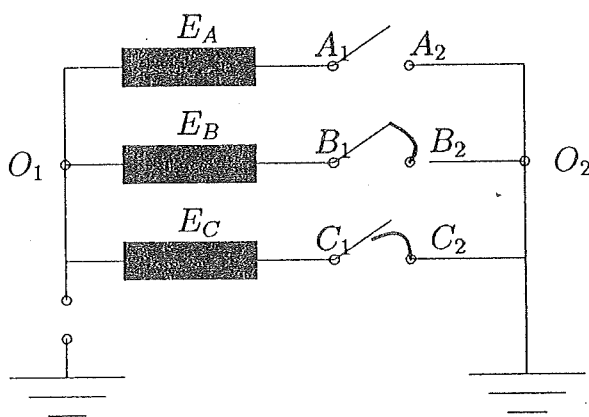
Toplotna snaga koja se oslobadja usled Džulovih gubitaka mora biti manja od toplotne snage koja se odvodi sa luka izazivajući njegovo hladjenje P_h . Ukoliko nije ispunjen uslov:

$$P_{rez} \leq P_h \quad (7.3)$$

dolazi do zagrevanja preostalog stuba luka, opadanja njegove otpornosti, porasta struje u njemu i do daljeg porasta toplotne snage koja se na njemu oslobadja. Porast oslobodjenje toplotne snage dovodi do daljeg porasta temperature preostalog stuba luka i povećanja stepena jonizacije. Ova pojava može da dovede do toga da se prostor ponovo jonizuje do te mere da struja preraste u struju kratkog spoja. Ova pojava se naziva **toplotnim probojem** medjukontaktog prostora. Ceo proces toplotnog proboja traje veoma kratko, a posledica je brzog porasta prelaznog povratnog napona $u_{ppn}(t)$ neposredno u okolini nule struje. Upravo zbog toga je veoma važan početni period uspostavljanja prelaznog povratnog napona koji skraćeno označavamo kao $PPPN$, jer ukoliko početni prelazni povratni napon brzo raste, to može da izazove efekat povećanja temperature preostalog stuba luka i toplotni proboj.

7.3 Faktor prvog pola

U slučaju isključenja trolejnog kratkog spoja prvo dolazi do gašenja luka na jednoj od faza na kojoj prvo prolazi struja kroz nulu. U tom slučaju veoma veliki uticaj ima način uzemljenja neutralne tačke transformatora i da li je kratak spoj sa dodirnom sa zemljom ili ne. Na slici 7.3 prikazana je zamenska šema sistema sa izolovanom neutralnom tačkom u kome se dogodio kratak spoj. Na slici 7.3 oznake imaju sledeće značenje:



Slika 7.3: Šema za tumačenje efekta faktora prvog pola

E_A, E_B, E_C –elektromotorne sile namotaja transformatora faza A, B i C ,

O_1 –neutralna tačka transformatora,

O_2 –mesto trolejnog kratkog spoja sa zemljom,

A_1, B_1, C_1 –kontakti prekidača sa napojne strane,

A_2, B_2, C_2 –kontakti prekidača sa strane mesta kratkog spoja.

Na slici je prikazan slučaj kada je na fazi A već došlo do gašenja luka, tako da struja protiče kroz konturu koju čine faze B i C , odnosno:

$$O_1 - B_1 - B_2 - O_2 - C_2 - C_1 - O_1 \quad (7.4)$$

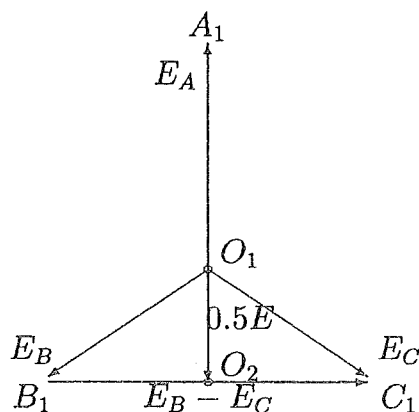
Ako su impedanse namotaja transformatora Z_T , tada se po II Kirhofovom zakonu može napisati jednačina ravnoteže za konturu 7.4:

$$E_B - 2Z_T I_{BC} - E_C = 0 \quad (7.5)$$

Amplituda struje u stacionarnom stanju u konturi 7.4 je:

$$I_{BC} = \frac{E_B - E_C}{2Z_T} \quad (7.6)$$

Na slici 7.4 prikazan je vektorski dijagram napona za slučaj kratkog spoja iza prekidača kada je luk ugašen na fazi A . Struju kratkog spoja između faza B i C stvara razlika



Slika 7.4: Vektorski dijagram napona u slučaju kada je luk ugašen na polu A prekidača

elektromotornih sila $E_{BC} = E_B - E_C$. U tački O_2 na mestu kratkog spoja potencijal u odnosu na neutralnu tačku je jednak razlici napona:

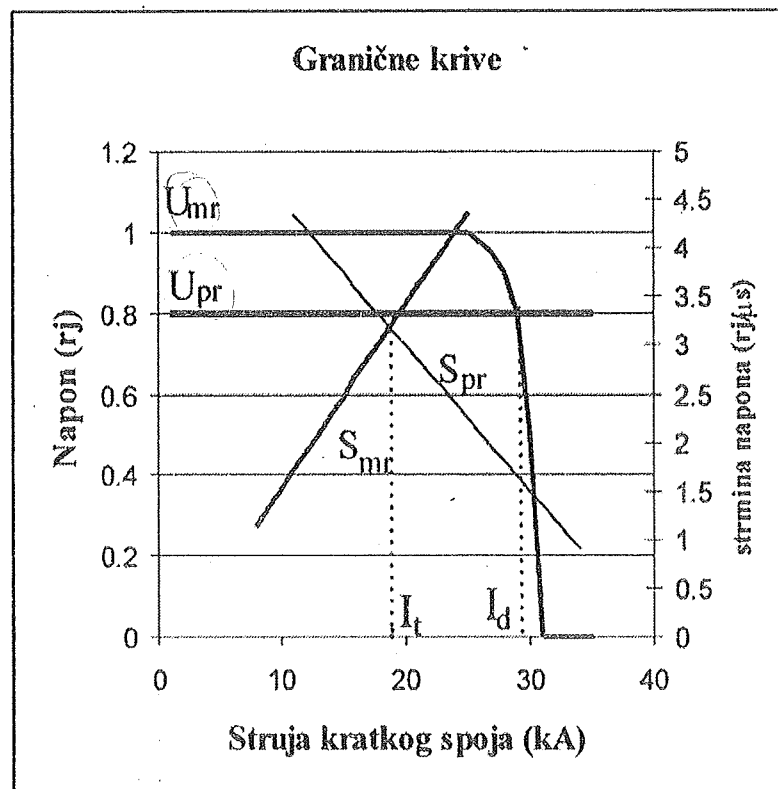
$$U_{O_1-O_2} = U_{O_1} - U_{O_2} = 0,5E_A \quad (7.7)$$

→ Tačka O_1 izolovane neutralne tačke nalazi se tačno na potencijalu koji odgovara polovini vektora E_{AB} . Povratni napon između kontakata $A_1 - A_2$ jednak je razlici napona $U_{A_1-A_2} = U_{O_1-A_1} - U_{O_1-O_2} = E_A + 0,5E_A = 1,5E_A$. To znači da se u ustaljenom stanju pri prekidu struje na fazi A između kontakata pola A prekidača uspostavlja povratni napon koji je za 50% viši od napona koji bi vladao kada bi neutralna tačka O_1 bila na potencijalu zemlje. Povećanje napona na polu prekidača koji je prvi isključio u slučaju kada je neutralna tačka izolovana naziva se **faktor prvog pola**. Faktor prvog pola u slučaju izolovane neutralne tačke iznosi 1,5, a u slučaju uzemljene neutralne tačke se usvaja da iznosi 1,3.

Ukoliko bi neutralna tačka bila uzemljena, a kratak spoj bez dodira sa zemljom, efekat bi bio isti kao kada je trolni kratak spoj sa dodiranjem sa zemljom, a neutralna tačka izolovana. Međutim, verovatnoća da se dogodi trolni kratak spoj bez dodira sa zemljom je mala, pa se stoga faktor prvog pola određuje isključivo na osnovu načina uzemljenja neutralne tačke, pretpostavljajući da je trolni kratak spoj uvek u dodiru sa zemljom.

7.4 Granične krive prekidača

Granične krive prekidača predstavljaju najviši prelazni povratni napon i strminu prelaznog povratnog napona koje prekidač može da podnese u zavisnosti od prekidne struje. Pri isključenju struja u konfiguracijama u kojima nastaju visoke vrednosti prelaznih povratnih napona relativno malih strmina postoji opasnost od dielektričkog proboja medjukontaktne razmaka (slučaj sabirničkog kratkog spoja, isključenje u opoziciji faza). Obrnuto, u konfiguracijama koje prouzrokuju velike strmine napona pojavljuje se opasnost od termičkog proboja (slučaj isključenja bliskog kratkog spoja, isključenje kratkog spoja neposredno iza transformatora). Na slici 7.5 prikazane su granične krive prekidača u zavisnosti od struje koju prekidač prekida. Oznake na slici 7.5 imaju sledeće značenje:



Slika 7.5: Granične krive napona i strmine napona u funkciji struje kratkog spoja

U_{pr} –podnosivi napon između kontakata koji prekidač može da izdrži,

U_{mr} –prelazni povratni napon koji nastaje u mreži u zavisnosti od struje,

S_{pr} –podnosiva strmina napona koju prekidač može da izdrži,

S_{mr} –strmina prelaznog povratnog napona koju mreža generiše pri isključenju bliskog kratkog spoja u funkciji struje kratkog spoja.

Prelazni povratni napon koji mreža generiše uopšte ne zavisi od struje kratkog spoja. Kod sabirničkog kratkog spoja maksimalna vrednost prelaznog povratnog napona zavisi samo od prigušenja u mreži i nekih manje značajnih faktora kao što je uticaj napona luka u trenutku gašenja. U svakom slučaju impedansa sistema koja ograničava struju kvara ne utiče na visinu prelaznog povratnog napona.

U slučaju bliskog kratkog spoja, kao što je ranije već izneto, početna strmina prelaznog povratnog napona funkcija je struje kratkog spoja je:

$$S_{mr} = \sqrt{2} Z_c I_{ks} k_{BKS} \omega \quad (7.8)$$

Oznake u izrazu 7.8 imaju sledeće značenje:

S_{mr} –početna strmina prelaznog povratnog napona koji generiše mreža pri bliskom kratkom spoju,

Z_c –karakteristična impedansa voda na kome se dogodio kratak spoj,

I_{ks} –efektivna vrednost struje sabirničkog kratkog spoja,

k_{BKS} –faktor redukcije struje kod bliskog kratkog spoja.

Na osnovu izraza 7.8 vidi se da početna strmina napona S_{mr} linearно zavisi od struje kratkog spoja I_{ks} .

Podnosivi napon između kontakata praktično je nezavisan od struje koja se prekida do neke granične struje kratkog spoja. Struje kratkog spoja koje su veće od granične proizvode intenzivnu jonizaciju medijuma za gašenje luka, tako da se posle gašenja luka regeneracija prostora između kontakata odvija sporo i snižava se podnosivi napon.

Podnosiva strmina prelaznog povratnog napona S_{pr} značajno opada sa amplitudom struje kratkog spoja zbog toga što je početna strmina prelaznog povratnog napona važna za termički proboj koji nastupa neposredno posle prolaska struje kroz nulu, kada je stepen jonizacije prostora između kontakata veoma zavisn od struje koja se prekida.

Pri struji, kada podnosivi napon između kontakata U_{pr} postane jednak prelaznom povratnom naponu U_m koji daje mreža, nastaje dielektrični proboj između kontakata. Ova struja obeležena je sa I_d . Pri struji, kada podnosiva strmina napona S_{pr} postane

jednaka strmini prelaznog povratnog napona koji daje mreža S_{mr} , nastaje termički proboj između kontakata. Ova struja je obeležena sa I_t . Kod pojedinih tipova prekidača granična struja termičkog proboja je veća od granične struje dielektričkog proboja, a kod drugih prekidača je obrnuto, što zavisi od tehnike gašenja luka i medijuma između kontakata.