

Slika 5.27: Prelazni režim pri višestrukome gašenju i ponovnim probojima između kontakata rastavljača

Sníženje ovih prenapona u  $SF_6$  postrojenjima se postiže višestrukim uzemljavanjem plašta postrojenja najkraćim provodnicima i pažljivim oklapanjem niskonaponskih veza. Posebno dobri efekti se postižu uvođenjem optičkog prenosa telekomunikacionih signala umesto žičnog prenosa.

## 5.6 Isključivanje malih induktivnih struja

### 5.6.1 Uslovi nastanka sečenja naizmenične struje pre prirodnog prolaska kroz nulu

Prilikom isključenja relativno malih naizmeničnih struja prekidačem, kontaktorom ili sklopkom, javljaju se procesi koji dovode do intenzivne dejonizacije prostora između kontakata sklopnog aparata koji mogu izazvati gašenje električnog luka pre prirodnog prolaza struje kroz nulu. Ovu pojavu nazivamo "sečenjem struje". Pojava "sečene struje" može prouzrokovati relativno visoke prenapone usled nagomilane elektromagnetske energije na induktivnim elementima u kolu.

Prilikom prekidanja relativno velikih struja koje su reda veličine naznačenih struja isključenja sklopnog aparata, električni luk ne može bitno da utiče na oblik struje koja se prekida, pa do gašenja luka dolazi praktično u prirodnoj nuli struje. Ovo je posledica

termičke inercijalnosti luka.

Svi sklopni aparati koji imaju komoru za gašenje luka se prema [15] mogu podeliti na dve grupe prema uslovima gašenja luka:

- Aparati sa zavisnom karakteristikom gašenja luka,
- Aparati sa nezavisnom karakteristikom gašenja luka.

Kod pojedinih tipova aparata ne može se jasno izvršiti razgraničenje prema gornjoj podeli zbog složenosti pojava prilikom gašenja luka i primene više načina dejonizacije medjukontaktnog prostora.

Kod aparata sa zavisnom karakteristikom gašenja luka, koji imaju medijum za gašenje koji se razlaže pri dejstvu visoke temperature, razvija se smesa gasova usled termičkog dejstva električnog luka. Ukoliko se veća struja prekida, termičko dejstvo luka je izraženije, pa su i procesi razlaganja medijuma za gašenje luka intenzivniji, što dovodi i do jačeg strujanja stvorenih gasova preko električnog luka. U ovu grupu aparata spadaju uljni, malouljni, hidromatski i drugi tipovi sklopnih aparata kod kojih se medijum za gašenje luka razlaže pri termičkom dejstvu električnog luka. U ovu grupu aparata spadaju i aparati sa magnetnim delovanjem na električni luk. Kod ovih aparata kompletna struja koja se prekida ili njen jedan deo prolaze kroz namotaj elektromagneta koji stvara magnetno polje koje deluje na luk. Delovanje na luk se manifestuje ili kao razvlačenje luka usled dejstva magnetnog polja, njegovo sabijanje u uzane procepe gde luk predaje svoju toplotnu energiju zidovima procepa, ili se vrši rotacija luka u gasu, što ima isti efekat kao kada bi luk bio nepokretan, a gas strujao.

Kod aparata sa nezavisnom karakteristikom intenzitet strujanja medijuma za gašenje luka ne zavisi od veličine struje koja se prekida. Kod ovih aparata poseban mehanizam izaziva strujanje medijuma za gašenje za vreme dok gori električni luk. Energija potrebna za strujanje medijuma za gašenje luka dovodi se iz posebnog izvora, za razliku od prethodnog slučaja kada je to toplotna ili magnetna energija električnog luka. U ovaj tip aparata spadaju pneumatski,  $SF_6$ , malouljni aparati sa pumpom za uštrcavanje ulja za vreme gašenja luka i drugi tipovi sklopnih aparata koji rade na sličnom principu.

Problem isključenja malih induktivnih struja je izraženiji kod aparata sa nezavisnom karakteristikom gašenja luka, jer se kod njih luk usled male struje gasi istim intenzitetom kao i kod struje kratkog spoja. Stoga se može dogoditi da luk male struje bude ugašen pre prirodnog prolaska struje kroz nulu.

Kod prvih vakuumskih sklopnih aparata dolazilo je do pojave izraženog sečenja struje. Kod ovih aparata medijum u kome gori električni luk čine metalne pare nastale

isparavanjem kontaktnog materijala usled termičkog dejstva luka. U trenutku odvajanja kontakata dolazi do usijavanja, topljenja i isparavanja materijala kontakata u poslednjoj tački dodira. Ove metalne pare su jonizovane čineći medijum u kome se razvija električni luk [19]. U dodiru sa hladnom elektrodom (uglavnom anodom), dolazi do kondenzacije metalne pare. Sa druge strane, na katodi postoje tačke emisije metalnih para u vidu malih katodnih mrlja. Katodna mrlja može da podržava električni luk određene gustine struje. U slučaju veće struje koja se prekida, stvara se veći broj katodnih mrlja. Smatra se da je struja električnog luka po jednoj katodnoj mrlji reda veličine 100-200 A.

Kada se struja smanjuje, smanjuje se broj katodnih mrlja, da bi na kraju ostala samo jedna. Ukoliko se dostigne nivo struje kod koje količina materijala koja se kondenzuje na hladnoj elektrodi postane veća od količine materijala koji se emituje u vidu metalne pare sa poslednje katodne mrlje, dolazi do nestabilnosti vakuumskog luka i sečenja struje.

Nivo sečenih struja kod vakuumskih sklopni aparata se bitno snizio primenom novih kontaktnih materijala koji omogućavaju stabilnost vakuumskog luka čak i pri relativno malim strujama.

Prema [20] savremeni sklopni aparati mogu se rangirati u pogledu veličine sečenih struja u sledeći red (prvom aparatu u listi odgovara najveća sečena struja, a poslednjem najmanja):

1. Pneumatski prekidači,
2. Malouljni prekidači,
3. Prekidači sa komprimovanim gasom (SF<sub>6</sub> aparati),
4. Vakuumski aparati.

Naravno, ovaj redosled se može samo uslovno usvojiti, jer pojedine konstrukcije aparata mogu imati osobine koje nisu tipične za takav tip aparata. Naprimera, pokazuje se da malouljni prekidači domaće proizvodnje ne izazivaju sečenje struje. Vakuumski aparati starije proizvodnje imali su veoma izraženu osobinu sečenja struje.

Tipične sklopne operacije koje dovode do visokih prenapona usled "sečenih struja" su:

- Isključenje struje magnećenja transformatora u praznom hodu,
- Isključenje struja visokonaponskih prigušnica (reaktora),

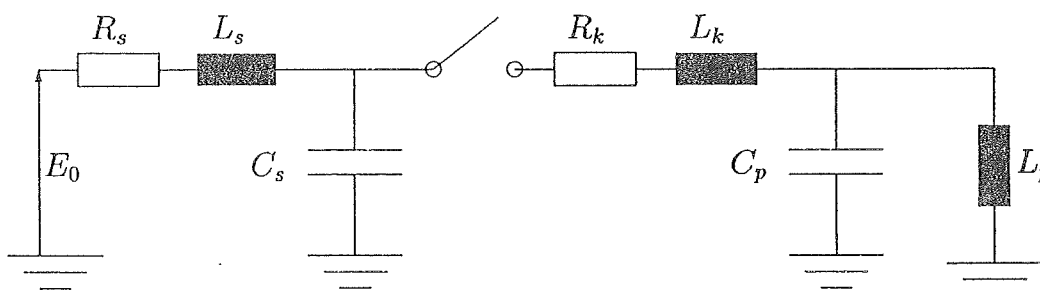
- Isključivanje transformatora opterećenog prigušnicom,
- Isključivanje visokonaponskog motora u zaletu,
- Isključivanje neopterećenih ili slabo opterećenih motora.

U slučaju sklopnih operacija sa motorima problem može biti naročito izražen u slučaju potrebe za velikim brojem sklopnih operacija kod intermitentnih pogona, kada zbog kumulativnog efekta može doći do slabljenja izolacije zbog velikog broja prenaponskih impulsa.

### 5.6.2 Fizičko tumačenje nastanka sečene struje

Prilikom isključivanja malih inuktivnih struja svi tipovi sklopnih aparata teže da dejstvom otpora luka smanje struju do nule pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Pri tome neki aparati to uspevaju da učine efikasnije od drugih. Kod vakuumskih aparata se sečenje struje može povezati sa nestabilnošću katodne mrlje neposredno pre sečenja, dok se kod ostalih tipova sklopnih aparata sečenje struje povezuje sa nestabilnom interakcijom električnog kola u kome se prekida struja električnog luka, prema [21].

Na slici 5.28 prikazana je pojednostavljena monofazna zamenska šema sistema u kome se analizira isključivanje malih inuktivnih struja. Oznake na slici 5.28 imaju



Slika 5.28: Monofazna zamenska šema sistema u kome dolazi do sečenja struje

sledeće značenje:

$E_0$  –temena vrednost fazne elektromotorne sile sistema,

$R_s$  –Otpornost usled gubitaka u sistemu sa strane izvora,

$L_s$  –Induktivnost sistema sa strane izvora,

$C_s$  –Kapacitet sistema sa strane izvora,

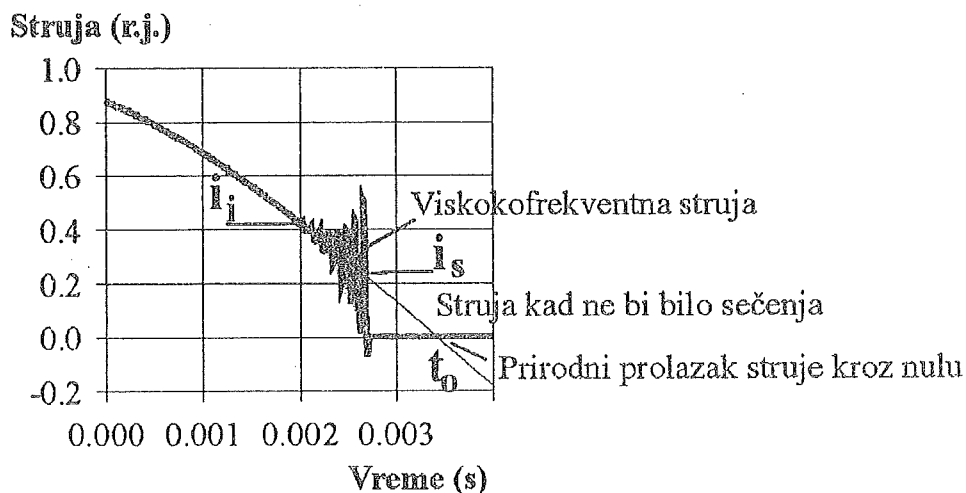
$R_k$  –Otpornost konture koju čini prekidač sa susednim kapacitetima,

$L_k$  –Induktivnost konture koju čini prekidač sa susednim kapacitetima,

$L_p$  –Induktivnost potrošača,

$C_p$  –Ulazna kapacitivost namotaja potrošača (motora, transformatora ili prigušnice).

Kada struja opadne ispod određenog nivoa, dolazi do nestabilnih oscilacija sa frekvencijom reda veličine  $100kHz$ . Oscilacije se vrlo brzo raspiruju, tako da se može smatrati da do sečenja struje dolazi gotovo odmah posle nastanka nestabilnih oscilacija. Vrednost komponente naizmjenične struje industrijske učestanosti u trenutku kada dolazi do sečenja struje iznosi  $i_s$ . Proces prekidanja sa karakterističnim veličinama prikazan je na slici 5.29, prema [21]. Oznake na slici 5.29 imaju sledeće značenje:



Slika 5.29: Proces nestabilnih oscilacija i sečenje struje

$i_i$  –struja pri kojoj počinju da se javljaju nestabilne oscilacije,

$i_s$  –komponenta struje industrijske učestanosti u trenutku kada dolazi do sečenja struje,

$t_o$  -prirodna nula struje.

Može se smatrati da do visokofrekventnih oscilacija struje dolazi u periodu malih struja kada otpornost električnog luka počinje vrlo naglo da menja vrednost, postajući bitan elemenat električnog kola, te sa ostalim parametrima kola utiče na tok struje. Stoga

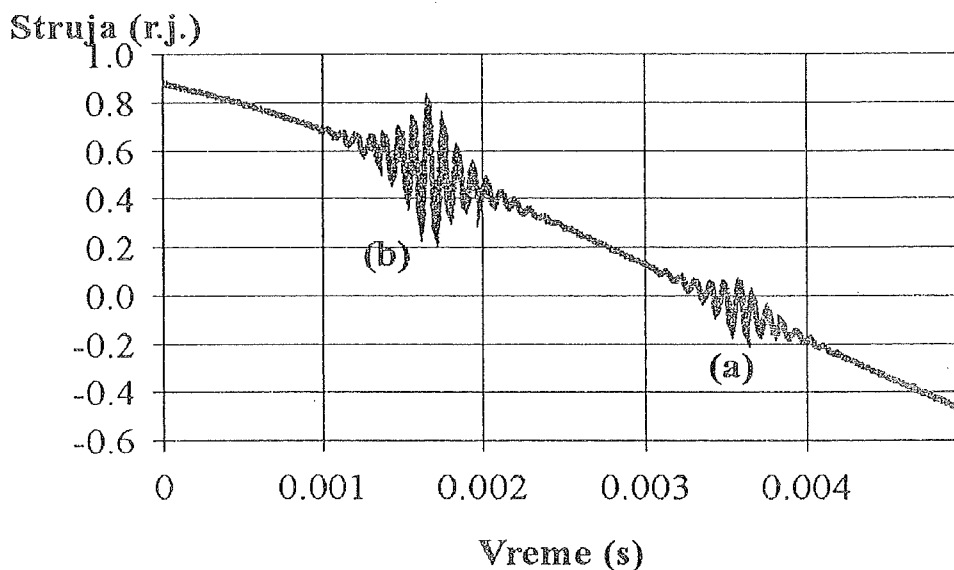
se može smatrati da u periodu nestabilnih oscilacija struje otpornost električnog luka zajedno sa induktivnošću konture u kojoj je priključen prekidač i kapacitetima sa obe strane prekidača utiču na tok prelaznog procesa. Sopstvena kružna učestanost konture prema slici 5.28 ima vrednost:

$$\omega_k = \frac{1}{\sqrt{L_k C}} \quad (5.39)$$

gde je:  $C$  –ekvivalentna kapacitivnost konture:

$$C = \frac{C_s C_p}{C_s + C_p} \quad (5.40)$$

Pošto induktivnost konture  $L_k$  ima malu vrednost, sopstvena učestanost ovog lokalnog kola može da bude vrlo visoka. Na slici 5.30 prikazani su slučajevi kada do nestabilnih oscilacija struje dolazi u okolini prirodne nule struje (slučaj a) i u okolini vrednosti stacionarne struje koja je različita od nule (slučaj b). U oba slučaja nestabilne oscilacije se postepeno smiruju i ne dolazi do gašenja luka.



Slika 5.30: Visokofrekventne oscilacije struje koje ne izazivaju sečenje struje

Na veličinu sečene struje ne utiču samo parametri prekidača, već i konfiguracija mreže u kojoj se vrši isključenje, posebno kapaciteti u neposrednoj okolini prekidača.

U [23] predlaže se sledeći empirijski koeficijent koji daje vrednost sečene struje u zavisnosti od ekvivalentnog kapaciteta konture:

$$i_s = k\sqrt{C} \quad (5.41)$$

gde su:

$k$  –empirijski koeficijent koji zavisi od vrste komore za gašenje luka,

$C$  –ekvivalentni kapacitet konture.

Porast sečene struje pri većim vrednostima kapaciteta može se protumačiti smanjenjem sopstvene učestanosti oscilacija struje, što dovodi do manje strmine struje u okolini nule. Sporije približavanje struje nuli olakšava gašenje luka zbog toga što stepen jonizacije električnog luka može lakše da prati smanjivanje struje.

Prema rezultatima istraživanja objavljenim u [24] vrednost empirijskog koeficijenta  $k$  kreće se od  $1 \cdot 10^4$  za pojedine srednjenaponske  $SF_6$  prekidače pa do  $20 \cdot 10^4$  za prekidače vrlo visokog napona. Struja sečenja se kreće za vakuumske prekidače od  $5 - 10A$ , a za ostale tipove prekidača od  $1A$  do nekoliko desetina  $A$ .

## 5.7 Prenaponi pri sečenju struje

Najjednostavnije tumačenje prenapona usled isključenja malih induktivnih struja je pomoću bilansa magnetne i elektrostatičke energije pre i posle gašenja luka.

Elektromagnetna energija na induktivnosti potrošača  $L_p$  neposredno pre sečenja struje je:

$$E_L = \frac{1}{2} L_p i_s^2 \quad (5.42)$$

gde je:  $i_s$  –vrednost sečene struje, prema slici 5.29.

Elektrostatička energija na ulaznom kapacitetu namotaja potrošača ima vrednost neposredno pre sečenja struje:

$$E_c = \frac{1}{2} C_p u_s^2 \quad (5.43)$$

gde su:

$C_p$  –ulazni kapacitet namotaja,

$u_s$  –trenutna vrednost napona na kapacitetu u trenutku sečenja.

Posle sečenja struje elektromagnetska energija iz induktivnosti se pretvara u elektrostatičku energiju. Ukupna elektrostatička energija na ulaznom kapacitetu namotaja potrošača nakon sečenja struje je:

$$E'_c = \frac{1}{2} C_p u_{max}^2 \quad (5.44)$$

gde je:

$u_{max}$  –temena vrednost napona na ulaznom kapacitetu namotaja potrošača nakon sečenja struje.

Na osnovu bilansa energija pre i posle sečenja struje može se doći do maksimalnog prenapona:

$$\frac{1}{2}C_p u_{max}^2 = \frac{1}{2}C_p u_s^2 + \frac{1}{2}L_p i_s^2 \quad (5.45)$$

Na osnovu gornjeg izraza može se odrediti maksimalni prenapon na namotaju potrošača nakon sečenja struje:

$$u_{max} = \sqrt{u_s^2 + \frac{L_p}{C_p} i_s^2} \quad (5.46)$$

Zbog gubitaka u realnim električnim kolima samo jedan deo magnetske energije se pretvara u elektrostatičku. Zato je uveden koeficijent gubitaka  $\eta$  kao odnos razlika elektrostatičke energije  $E'_c - E_c$  posle sečenja struje i magnetske energije na induktivnosti potrošača  $E_L$  pre sečenja, koji je definisan sledećim izrazom:

$$\eta = \frac{E'_c - E_c}{E_L} \quad (5.47)$$

Izraz 5.46 za maksimalni prenapon nakon sečenja struje se sada može prikazati u sledećem obliku:

$$u_{max} = \sqrt{u_s^2 + \eta \frac{L_p}{C_p} i_s^2} \quad (5.48)$$

Koeficijent  $\eta$  ima vrednost blisku jedinici za motore, jer na njega utiču samo Džulovi gubici u prvoj poluperiodi prelaznog procesa. U slučaju transformatora u praznom hodu koeficijent  $\eta$  se kreće od 0,3 do 0,5, jer dominantan uticaj imaju gubici u magnetnom kolu. Treba da se vodi računa da su i električni i magnetski gubici veći pri visokofrekventnim pojavama od gubitaka pri industrijskoj učestanosti.

Analizirajući izraz 5.48 može se uočiti da nivo prenapona raste sa vrednošću sečene struje  $i_s$ . Visina prenapona u monofaznom kolu najviše zavisi od kapaciteta namotaja potrošača  $C_p$ , induktivnosti  $L_p$  i veličine sečene struje. Ukoliko je temena vrednost struje koja se prekida viša od nivoa sečene struje sklopnog aparata, tada nivo sečene struje malo zavisi od amplitude struje koja se prekida. Obrnuto, ukoliko je nivo struje sečenja veći od amplitude prekidne struje, tada je maksimalna sečena struja određena temenom vrednošću prekidne struje.