

Dr. sc. Radovan Milošević, dipl. ing.  
KONČAR – EASN d.d., Zagreb  
[uprava@koncar-easn.hr](mailto:uprava@koncar-easn.hr)

Ime Prezime autora3  
Naziv tvrtke/ustanove  
[E-mail adresa autora3](#)

Željko Bago, dipl. ing.  
KONČAR – EASN d.d., Zagreb  
[zeljko.bago@koncar-easn.hr](mailto:zeljko.bago@koncar-easn.hr)

Ime Prezime autora4  
Naziv tvrtke/ustanove  
[E-mail adresa autora4](#)

## O NEKIM OSOBITOSTIMA VAKUUMSKIH SKLOPNIH APARATA

### SAŽETAK

Vakuumska sklopna tehnika je definitivno osvojila područje sklopnih aparata i aparatura srednjeg napona, a sve više ulazi i na područje sklopnih aparata visokog napona.

Radi se o ultravisokom vakuumu, što spada u vrlo sofisticirano tehničko područje, u kojem su se pri istraživanju i razvoju u svrhu primjene u sklopnoj tehnici i prvim rješenjima sklopnih aparata javljali razni problemi. Svi ti problemi su davno riješeni, proizvođači su ih i zaboravili, ali se u praksi još uvijek mogu čuti pitanja i komentari vezani za neke od njih, koji su u početku razvoja vakuumske tehnike isticali kao teško rješivi.

U ovom članku je dat osvrt na neka od tih, specifičnih pitanja i to: rezanje struje u vakuumu, virtualno rezanje struje u vakuumu, provjera vakuuma u vakuumskim komorama, energetki nepodržana izbijanja u vakuumu (NSDD), trajnost vakuumskih komora i röntgensko zračenje vakuumskih komora.

Ukazano je o kakvim se problemima radi i kako su u praksi riješeni.

**Cljučne riječi:** rezanje struje, vakuum, energetski nepodržana izbijanja u vakuumu, röntgensko zračenje

## ABOUT SOME ESPECIALLY OF VACUUM SWITCHING APPARATUSES

### SUMMARY

Vacuum switching technique definitely prevailed in construction of medium voltage apparatuses and modules. Also, more and more it is used in construction of high voltage apparatuses.

In research and development of ultra high vacuum, which is technically very sophisticated area, many various problems occurred in early solutions of switching apparatuses. Most of these problems have been solved long time ago, the manufacturers even forgot about them, but some of these questions and comments still may be found in practice, especially the problems which were considered difficult to solve.

This article deals with some of these specific questions, as follows: current chopping in vacuum, virtual current chopping in vacuum, inspection of vacuum quality in vacuum interrupters, energy non-sustained disruptive discharge (NSDD) in vacuum, life of vacuum interrupters and X-ray emission of vacuum interrupters.

The list of problems and the ways of their solutions in practice have been pointed out.

**Key words:** Current chopping, vacuum, energy non-sustained disruptive discharge, X-ray emission

## 1. UVOD

Početna dvojba oko prevlasti vakuumske ili SF<sub>6</sub> sklopne tehnike otpala je čim su riješeni tehnički i tehnološki problemi vezani za proizvodnju vakuumskih komora. Tehnika sklapanja temeljena na SF<sub>6</sub> plinu ostala je i dalje prevladavati u gradnji visokonaponskih prekidača, jer još postoje tehničko-tehnološki problemi koji otežavaju optimalnu gradnju vakuumskih komora relativno velikih dimenzija. Velika je vjerojatnost da će, čim se ovlada tehnologijom gradnje većih vakuumskih komora te snizi njihova proizvodna cijena, SF<sub>6</sub> tehnika ustupiti mjesto vakuumskoj i na području sklopnih aparata visokog napona. To se praktično već i događa. Prekidači za nazivni napon 72,5 kV i 110 kV pa i viši, ranije s više vakuumskih komora u seriju, a sada već s jedinstvenom vakuumskom komorom, proizvode se i isporučuju u nekim tehnički najrazvijenijim zemljama svijeta (Japan, SAD itd.).

Zbog izuzetnih dielektričnih karakteristika plina SF<sub>6</sub> te vakuuma kao idealnog medija za gašenje električnog luka, danas je pri gradnji modernih sklopnih aparata odnosno sklopnih blokova učestala njihova kombinacija. Plinom SF<sub>6</sub> se omogućava minimiziranje dimenzija sklopnih modula, a vakuumom efikasno sklapanje struje.

Bezkontaktno (bezlučno) prekidanje temeljeno na poluvodičima te istraživanja na području supravodljivosti predstavljaju danas jedinu vrijednu alternativu lučnim sklopnim aparatima, no za sada ne nude mogućnost racionalne gradnje i praktične uporabe sklopnih aparata standardnih parametara. Zato je realno očekivati da će vakuumska sklopna tehnika potrajati znatno dulje od ostalih, kroz povijest korištenih sklopnih tehnika.

## 2. PROVJERA VAKUUMA U KOMORAMA

Najčešće pitanje koje se pojavljuje u svakoj diskusiji o temi vakuumskih sklopnih aparata je: "Kako znamo da li je u komori još uvijek vakuum?". Sa stanovišta proizvodnje, integritet vakuuma u neposrednoj vezi je s kvalitetom materijala za izradu elemenata te spojeva među raznorodnim elementima vakuumskih komora (lemljenja i zavarivanja). Posebnu poteškoću predstavlja spajanje materijala različitih stupnjeva temperaturnih rastezanja. Zbog toga se keramički dijelovi dodatno metaliziraju kako bi se lemljenjem mogli spojiti s metalnim dijelovima.

U svrhu procjene trajnosti vakuumskih komora (magnetronom), proizvođači vrše vrlo rigorozne provjere propuštanja (helijevim 'leak' detektorom) koje se provode na podsklopovima te provjeru vakuuma na gotovim vakuumskim komorama,

Korisnike, međutim, jako zanima da li komore imaju potrebni vakuum i mogu li se aparati u koje su ugrađene bez bojazni staviti pod napon odnosno u funkciju?

Vrlo je lako ustanoviti da li je komora u potpunosti izgubila vakuum ili ne.

Naime, kontakti komore u kojoj postoji vakuum su međusobno priljubljeni (čvrsto), uslijed djelovanja vanjskog atmosferskog tlaka na metalni mijeh koji omogućava gibanje pomičnog kontakta u vakuumskoj komori. Potrebno je samo povući pomični kontakt da bi se kontakti u komori razdvojili. Ako je komora potpuno izgubila vakuum, pomični kontakt je labav i lagano pomičan. Prekidači, sklopke i sklopnici građeni su tako da je ta provjera moguća i na terenu, dakle na aparatima koji su u eksploataciji. Treba samo olabaviti sklopne opruge i opruge koje daju dodatni kontaktni pritisak među kontaktima i prikladnim alatom provjeriti otpor pri pokušaju njihovog otvaranja.

Nažalost, ovakva provjera vakuuma ne ukazuje da je on i dostatan za uspješno obavljanje definirane funkcije (sklapanja struje u svim uvjetima), pa kao takva i nije od neke koristi. Provjera nam tek nudi spoznaju da komora koja je u potpunosti izgubila vakuum više sigurno nije za upotrebu.

Parcijalni gubitak vakuuma zahtijeva drugačije metode detekcije. Kriteriji koji se pri tome uspostavljaju garancija su za definiranu trajnost vakuumske komore. Korisnik može povremeno provjeriti da li je razina vakuuma u vakuumskim komorama u dozvoljenim granicama, dakle dobiti kvalitativnu sliku stanja vakuuma. To se vrši relativno jednostavnim prijenosnim uređajima, koje nazivamo vakuumtesterima ili 'vakuumcheckerima', čiji se princip rada svodi na mjerenje mikrostruja ( $\mu A$ ), kada se otvoreni kontakti u komorama dovedu pod određeni napon. Pri tome neki od uređaja ukazuju na stanje vakuuma samo signalnim lampicama: (zeleno-dobar, crveno-loš), dok se na drugima mogu očitati mikrostruje i usporediti s dopuštenim vrijednostima iz tablice kod dotičnog napona.

Zanimanje za gubitak vakuuma je razumljivo, ali zapravo ne i naročito opravdano, jer je učestalost kvarova uslijed ovog problema minimalna. Tehnologija je već toliko razvijena da više i ne dolazi do gubitka vakuuma te time ni do ozbiljnih posljedica u procesima prekidanja.

### 3. ENERGETSKI NEPODRŽAVANO IZBIJANJE – NSDD (NON-SUSTAINED DISRUPTIVE DISCHARGE)

Pri ispitivanju vakuumskih sklopnih aparata, može se pojaviti fenomen specifičan samo za vakuum i ne susreće se pri ispitivanju aparata s drugim principima gašenja luka.

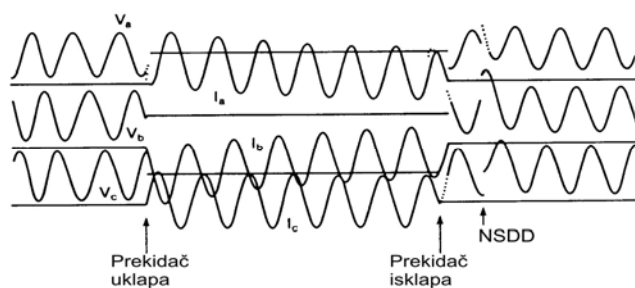
Čak i u praksi je uvriježeno samo kao NSDD (Non – sustained disruptive discharge), pojava energetski nepodržavanog izboja koji se javlja pri prekidanju struje u vakuumu. Raspravu o tom fenomenu možemo pronaći u mnogim literaturama, a događaji dovode do zanimanja za interpretaciju publikacije IEC 62271-100 (ranije IEC 56). Temu razmatra i STLA (The Short-Circuit Testing Liaison Agreement – Savjetodavna grupa; savez međunarodnih certifikacijskih tijela za područje visokonaponskih ispitivanja i ispitnu opremu, utemeljen 1969.) u Vodiču za tumačenje publikacije IEC 56: "Tom prilikom, jedan ili više energetski nepodržanih izboja mogu se pojaviti tijekom perioda povratnog napona nakon operacije prekidanja. NSDD definiran je kao izboj između kontakata tijekom perioda povratnog napona koji rezultira protjecanjem visokofrekventnih struja, što se odnosi na lutajuće kapacitivnosti same komore".

Prisutnost takvog izboja može se prepoznati proučavanjem ispitnih oscilograma na Slici 1.

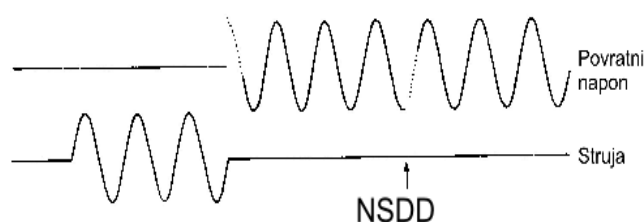
Slika 1.a) predstavlja tipičnu situaciju kod trofaznog prekidanja i prikazuje trenutni kolaps povratnog napona na jednoj od faza, što može rezultirati grananjem valova izmjeničnog povratnog napona u svim fazama, dok amplituda i vremenska konstanta ovise o lokalnim vrijednostima  $L$ ,  $R$  i  $C$ .

Slika 1.b) prikazuje ekvivalentnu situaciju kod jednofaznog sklapanja.

Propisi navode da tijekom ispitivanja uklopne i prekidne moći prekidač ne smije pokazivati ni znakove većeg oštećenja (havarije) niti ugroziti osoblje. Pojava NSDD tumači se kao pokazivanje nekih znakova oštećenja. Za ocjenu ponašanja važan je stupanj do kojeg ide oštećenje.



a) Tipični NSDD pri sklapanju u trofaznom strujnom krugu



b) Tipični NSDD pri sklapanju u jednofaznom strujnom krugu

Slika 1. Tipični NSDD pri sklapanju u vakuumskim komorama u trofaznom i jednofaznom strujnom krugu

U slučaju pojave ovog fenomena, slijedeći uvjeti ukazuju na prihvatljivost prekidača za certificiranje:

- period trajanja povratnog napona industrijske frekvencije treba biti produljen najmanje 0,3s nakon prekida struje, bez obzira na to da li se fenomen NSDD pojavio ili ne
- certifikacija se neće dozvoliti ako ima četiri ili više pojava NSDD-a tijekom cijele serije ispitnih ciklusa (test *duties*) zahtijevanih prema standardu, uključivši i ponavljanja ili ponovno započinjanje ciklusa iz bilo kojeg razloga

- c) ukoliko se fenomen pojavi više puta tijekom perioda povratnog napona jednog ispitivanja, te pojave treba brojiti odvojeno
- d) obnavljanje industrijske frekvencije vezano za izmjeničnu struju potaknutu energetski nepodržanim izbojem ne dozvoljava se, iako ono može rezultirati protokom struje u jednostrukoj petlji

Nakon što se dobije certifikat za prekidač na temelju serije testova tijekom kojih se pojavio NSDD, u ispitno izvješće dodaje se napomena: "Pri ispitivanju provedenom u svrhu dobivanja ovog Certifikata, NSDD se pojavio tijekom perioda povratnog napona...". Neki autori, kao i autori ovog teksta, smatraju da je ovaj navod diskriminirajući, jer pojava ne uzrokuje praktično nikakve probleme, niti ima posljedica na aparat, ispitnu opremu ni mrežu u kojoj je ovakav aparat ugrađen.

#### 4. PROVJERA STANJA KONTAKATA NAKON ISPITIVANJA PREKIDNE MOĆI

Standardi zahtijevaju da, nakon što je prekidač prošao ispitivanje prekidne moći, stanje kontakata treba biti takvo da on može i dalje prekidati i voditi nazivnu struju bez prekomjernog zagrijavanja kontakata. Tradicionalno, kod prekidača se to provjeravalo ili pregledom kontakata ili ispitivanjem zagrijavanja prekidača. Dakako, nemoguće je pregledati stanje kontakata u hermetički zatvorenoj vakuumskoj komori pa se mora provesti provjera stanja kontakata (provjerom kontaktnih otpora).

Proizvođači vakuumskih prekidača smatraju nepotrebnim zahtjev da vakuumske komore nakon ispitivanja prekidne moći još moraju zadovoljiti i ispitivanje zagrijavanja kakvo nije propisano za druge medije. Budući da uvjeti unutar vakuumske komore dozvoljavaju kontaktima da budu u funkciji pri visokim temperaturama bez nepoželjnih efekata, zahtjev nema nikakvog značaja.

Kompromis koji je postignut kaže da: "Stanje kontakata nakon ispitivanja prekidne moći smatra se prihvatljivim ako maksimalna temperatura kontakata zabilježena na stezaljkama bilo koje vakuumske komore ne prelazi više od  $10^{\circ}$  K od vrijednosti specificirane u propisu".

Primjenjive su vrijednosti porasta temperature navedene za priključke, vijčane ili ekvivalentne spojeve (Tablica V publikacije IEC 60694).

#### 5. ODREĐIVANJE VIJEKA TRAJANJA SKLOPNIH APARATA

Dugi vijek trajanja je privlačna značajka vakuumskih komora, no ipak, njihov vijek trajanja nije neograničen. Pri normalnim okolnostima, ograničavajući elementi su kontakti. Pri svakom prekidanju struje u komori se pojavljuje luk, nešto materijala se otopi i ispari s kontaktne površine. Količina isparenja je minimalna pri sklapanju bez tereta, ali je daleko značajnija pri prekidanju struja kratkog spoja ili uklapanja na kratki spoj, posebno ako je luk sužen, kada se veća količina materijala s kontakata rastopi i u obliku kapljica prelazi na zaštitni plašt oko kontakata. Dakle, s vremenskog gledišta, trajnost vakuumskih komora je ograničena zbog kvarenja vakuuma, a s gledišta broja sklapanja kriterij je trošenje kontakata.

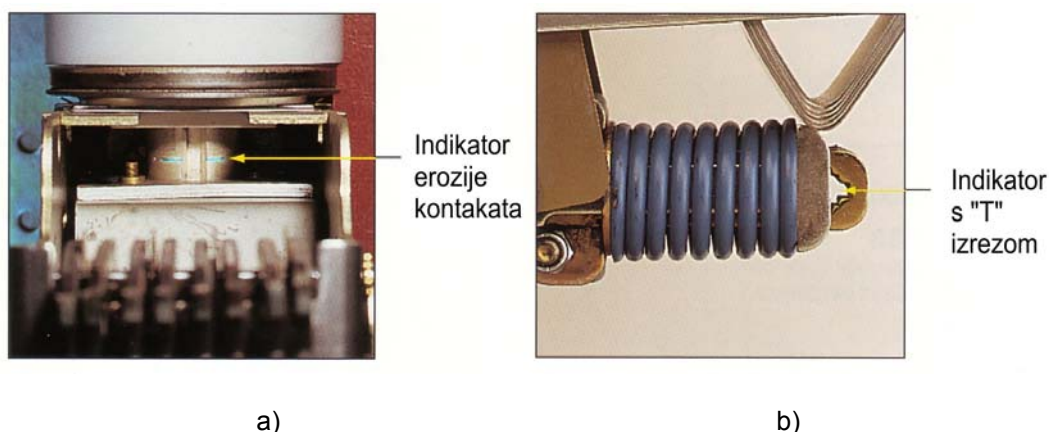
Vremensku trajnost komora definira se dozvoljenim kvarenjem vakuuma. Tako npr. propusnost od  $10^{-13}$  Pa l/s za prosječnu dimenziju komore garantira vijek trajanja od minimalno 30 godina. Trošenje kontakata od npr. 3 mm omogućava prosječnoj komori 10 000 sklapanja nazivne struje i 100 sklapanja maksimalne struje kratkog spoja.

Kontakti u vakuumskoj komori su čvrsto priljubljeni zajedno pomoću opruga koje daju dodatnu kontaktnu silu. Kontaktne opruge imaju dovoljan ugrađeni prednapon, da se kontaktna sila ne mijenja značajno nakon što je došlo do trošenja kontakata. Kako trošenje kontakata porastom broja sklapanja napreduje može se ustanoviti time što pomični kontakt upada sve dublje u komoru. Ta činjenica je iskorištena za uspostavu vidljive indikacije trošenja kontakata, što je uvedeno kao kriterij za zamjenu komora zbog istrošenosti kontakata.

Proizvođači imaju različite načine označavanja utonuća pomičnih kontakata odnosno trošenja kontakata. Jedni to označavaju crtom (urezana ili ucrtana) na nosačima pomičnih kontakata u početnom (novom) stanju komore te drugom crtom do koje kontakti smiju utonuti kada su maksimalno istrošeni.

Primjer takvog indikatora prikazan je na Slici 2.a, gdje je prekidač prikazan u isklopljenom položaju. Kada oznaka (crta) uroni u komoru u ravninu ploče za pričvršćenje, kontakti su istrošeni i komore (sve tri na tropolnim prekidačima) treba zamijeniti.

Na Slici 2.b je primjer indikatora istrošenosti kontakata na kontaktnoj opruzi.

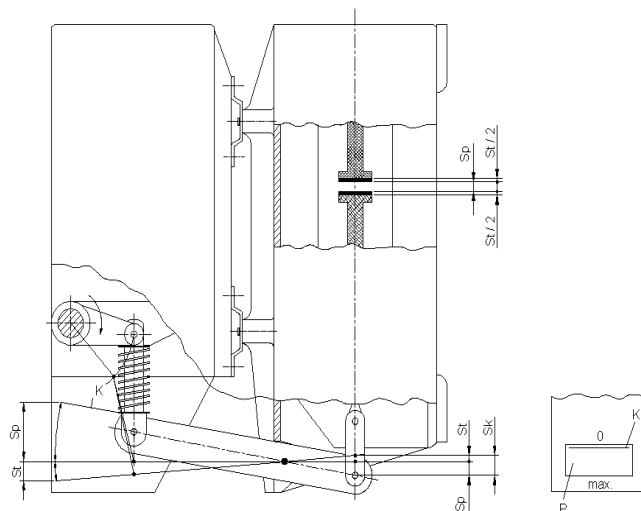


Slika 2. Indikatori istrošenosti (erozije) kontakata u vakuumskim komorama

Ovakvi indikatori trošenja kontakata imaju prednost, jer neposredno ukazuju na njihovu istrošenost, ali im je mana što se nalaze na polovima, dakle na stražnjoj strani prekidača koja najčešće nije dostupna za vizualnu kontrolu u radnom položaju. Za provjeru istrošenosti kontakata prekidač treba odvojiti od napona i izvući u ispitni položaj, što nije racionalno, osim pri redovnom održavanju prekidača.

Stoga, neki proizvođači izводе tzv. posrednu indikaciju trošenja na elementima koji su u vezi s pomičnim kontaktima.

Na Slici 3. je primjer takvog indikatora građenim s klackalicama za prijenos sila i gibanja od mehanizma na pomične kontakte u vakuumskim komorama. Klackalica je s jedne strane vezana za pomični kontakt u vakuumskoj komori, a na drugom kraju nosi kazaljku koja se vidi na otvoru poklopca pogonskog mehanizma. U početnom položaju se kazaljka na otvoru postavi na oznaku min. Kada se kontakti potroše, kazaljka dođe u položaj max., kada komore treba zamijeniti.



Slika 3. Indikator istrošenosti kontakata na vakuumskom prekidaču serije V – Končar

Pri normalnim eksploatacijskim uvjetima rijetko kad je potrebno zamijeniti vakuumске komore uslijed značajne istrošenosti (erozije) kontakata. Često sklapanje velikih tereta, kao što je na primjer sklapanje lučnih peći, može zahtijevati takvu zamjenu komora.

## 6. REZANJE STRUJE U VAKUUMU

Pojavu prekidanja struje prije njezinog prolaska kroz prirodnu nul-točku nazivamo rezanjem struje. Ovaj fenomen („Chopping-Phenomen”) se javlja kod svih sklopnih aparata s medijima koji snažno gase električni luk u procesu prekidanja. On je osobito izražen pri prekidanju malih induktivnih struja, a posljedica je nestanka uvjeta za stabilno gorenje električnog luka. Rezanje struje nastaje zajedničkim djelovanjem prekidne lučne komore sklopnog aparata i njemu paralelnih kapaciteta sa strane izvora i tereta.

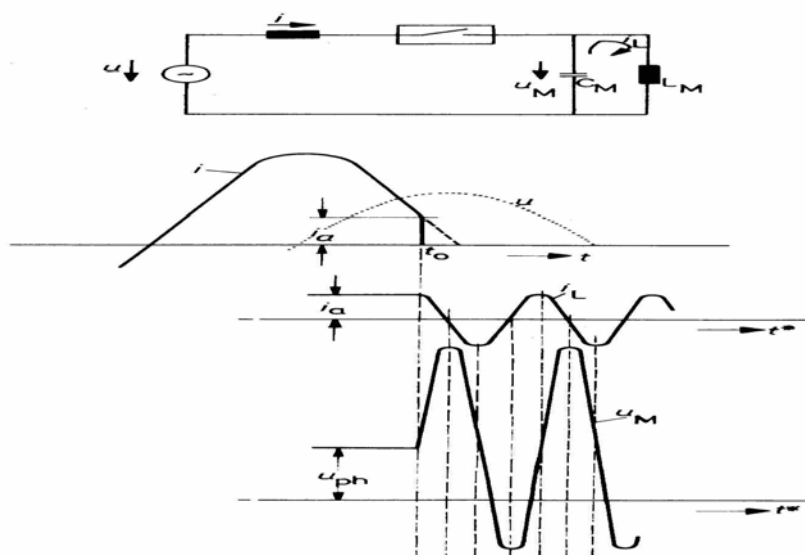
Prenapon zbog rezanja struje pribraja se (Slika 4.) prijelaznom povratnom naponu, a vršna vrijednost napona na strani tereta ovisi o iznosu napona ( $u$ ) u trenutku rezanja i veličini odrezane struje ( $i$ ).

Prenapon se može izračunati iz jednadžbe konverzije (1) pohranjene elektrostatičke energije tereta (karakterizirana naponom  $u$ ) te pohranjene elektromagnetske energije tereta (karakterizirana odrezanom strujom  $i$ ) u novu elektrostatičku energiju tereta (karakteriziranu maksimalnim naponom  $u_M$ ).

$$\frac{1}{2} C_M u^2 + \frac{1}{2} L_M i_a^2 \eta_M = \frac{1}{2} C_M u_M^2 \quad (1)$$

Ovdje je:

- $i_a$  - struja rezanja,
- $L_M, C_M$  - induktivitet (H), kapacitet (F) na strani tereta,
- $u$  - napon na strani tereta pri rezanju struje,
- $u_M$  - maksimalni napon na strani tereta,
- $\eta_M$  - kvocijent energije demagnetiziranja i magnetiziranja ovisan o nelinearnosti magnetskog materijala jezgre, stupnju magnetiziranja i prirodnoj frekvenciji kruga tereta



Slika 4. Rezanje struje u vakuumu u procesu isklapanja

## 7. VIRTUALNO REZANJE STRUJE U VAKUUMU

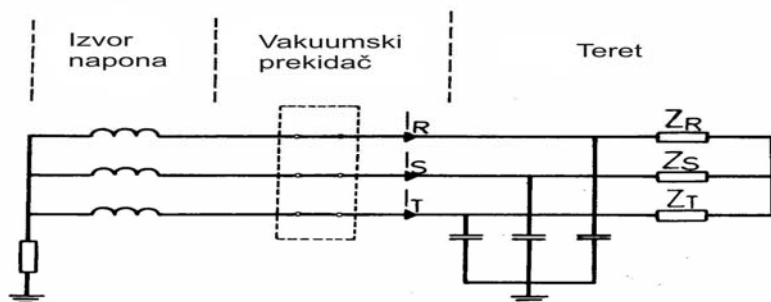
Virtualno rezanje struje pri sklapanju vakuumskim prekidačem je fenomen otkriven sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Ono se može pojaviti u nekim strujnim krugovima (pretežno pri isklapanju ispražnjenih kondenzatorskih baterija), a za posljedicu može imati visoke prenapone koji, ako nisu pod kontrolom, mogu značajno oštetiti opremu iza prekidača.

Ova pojava se bitno razlikuje od poznatog, prethodno opisanog rezanja malih struja od nekoliko ampera u blizini prirodne nul-točke struje, kada električni luk postaje nestabilan, što se događa, manje ili više, kod svih vrsta medija za gašenje luka.

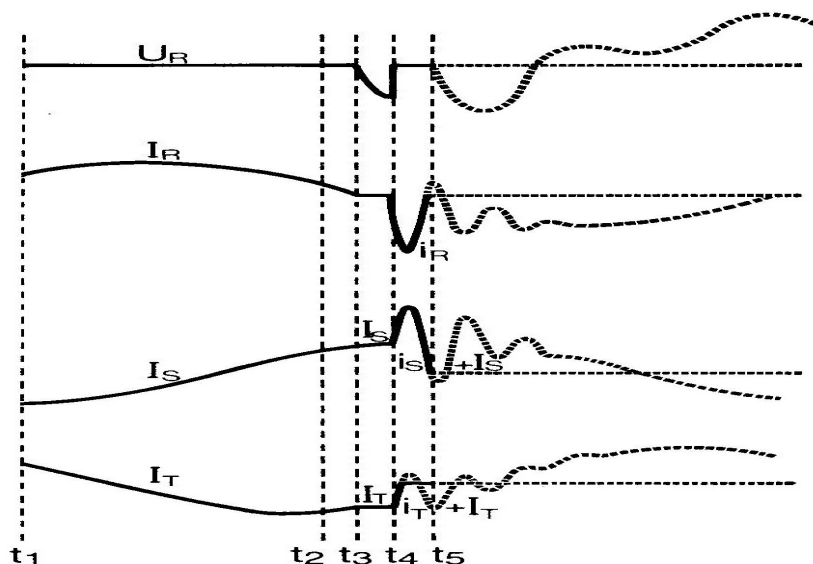
Ovisno o vrsti materijala za gradnju kontakata u vakuumskim komorama, ovdje se može pojaviti virtualna struja rezanja i od preko 250 A. Prenaponi u uvjetima rezanja ovakvih struja mogu dovesti do ponovnog paljenja luka u jednom od polova što dovodi do proboja i neuspjelog gašenja luka.

Pojava se može objasniti pomoću Slika 5. do 8.

Na Slici 5. prikazan je trofazni strujni krug s izvorom napajanja, vakuumskim prekidačem u uklopljenom položaju te teretom iza njega.



Slika 5. Strujni krug s uklopljenim prekidačem

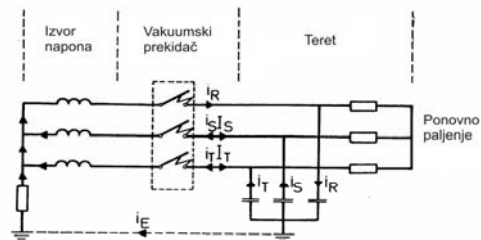
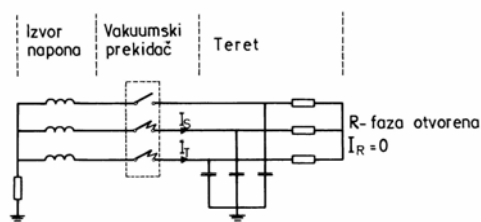


Slika 6. Oscilogram prekidanja struje

Struje  $I_R, I_S, I_T$  (Slika 5.) teku u intervalu vremena  $t_1 - t_2$ , pa u trenutku  $t_2$  počinje isklapanje. Kontakti prekidača se otvaraju i u prvoj nuli struje u fazi R luk se gasi u točki  $t_3$  (Slika 6.). Javlja se prijelazni povratni napon između kontakata faze R s frekvencijom reda veličine 1-20 kHz.

Trofazni strujni krug se razdvaja na dvofazni sa strujama koje su po iznosu jednake, ali međusobno pomaknute za 180 električnih stupnjeva (Slika 7.a).

U trenutku  $t_4$ , dok se kontakti prekidača još nisu dovoljno razmaknuli pa dielektrična čvrstoća vakuuma nije dovoljna da osigura ostajanje krivulja probojnog napona iznad krivulje povratnog napona, dolazi do paljenja električnog luka i ponovnog toka struje. Povratna struja može se pojaviti na dva preostala pola (Slika 7.b) i njen iznos se pribraja postojećoj struji frekvencije 50 Hz koja teče tim polovima.



a) Krug s prekinutom strujom u fazi R

b) Krug s ponovno upaljenim lukom u fazama S i T

Slika 7. Strujni krugovi u procesu prekidanja struje

U sljedećoj nul-točki koja u krugovima visoke frekvencije dolazi nakon vrlo kratkog vremena, ova struja će uzrokovati ponovno paljenje luka.

Vakuumski i drugi prekidači, čija je karakteristika vrlo brzo obnavljanje dielektrične čvrstoće između otvorenih kontakata, mogu prekinuti ovu ponovno upaljenu visokofrekventnu struju u njevoj nul-točki. Ovo može rezultirati prethodnim prekidanjem struje frekvencije 50 Hz pod uvjetom da su kontakti već otvoreni i da je luk počeo gorjeti ( $t_5$ ). Zbog toga što je pribrojena struja visoke frekvencije, prekidanje struje frekvencije 50 Hz se manifestira kao rezanje ove struje.

Budući da visokofrekventna struja prije prolazi kroz nul-točku, dolazi i do prekidanja struje osnovne frekvencije prije njenog prirodnog prolaza kroz nul-točku. Zato prekidanje struje prijelazne pojave nazivamo virtualnim rezanjem struje.

Pojava virtualnog rezanja struje počinje prolaznim povratnim paljenjem luka na što imaju utjecaj kvaliteta kontaktnog materijala i naponske karakteristike prekidača.

Istraživanja su pokazala da pojava virtualnog rezanja struje češće nastaje ukoliko su istovremeno ispunjeni određeni uvjeti:

- razdvajanje kontakata u trenutku vrlo blizu nul-točke struje
- dovoljno visoki napon mreže
- ograničenje struje osnovne frekvencije 50 Hz
- serijski induktivni krug s niskim faktorom snage
- veliki kapacitet između faza i mali kapaciteti prema zemlji

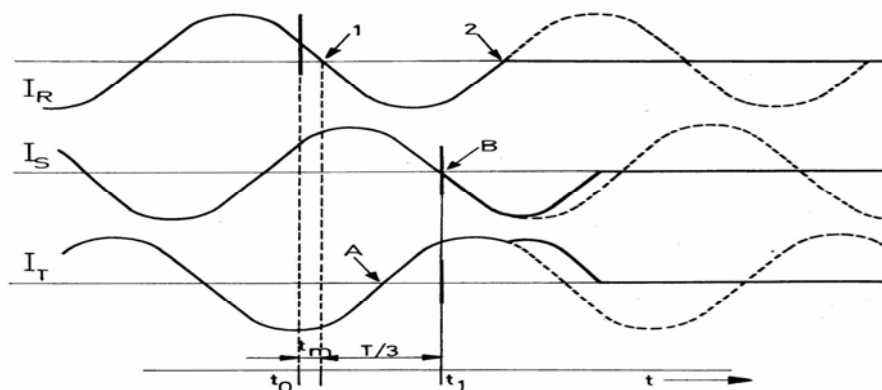
Premali kapacitet ograničava mogućnost pojave ponovnog paljenja, time i mogućnost pojave virtualnog rezanja struje, a preveliki kapacitet ograničava strminu povratnog prijelaznog napona i omogućava ponovno paljenje luka. Tipičan primjer kruga s ovakvim uvjetima je isklapanje motora u zaletu.

Iako je ova pojava tek s relativno malom vjerojatnošću moguća, neki od proizvođača vakuumskih prekidača su je rješenjima svojih prekidača izbjegli. Ilustrativno je rješenje (Holec) vakuumskog prekidača s tzv. prethodnim otvaranjem jednog pola s kojim se spomenuti problem pojave virtualnog rezanja struje izbjegava.

Princip je prikazan na Slici 8., a svodi se na sljedeće: tijekom prekidanja struje otvaraju se kontakti u vakuumskoj komori jednog pola 8 - 10 ms prije preostalih dvaju polova. U polu R, koji je odabran za prethodno otvaranje, razlika u vremenu između razdvajanja kontakata u njemu i preostala dva pola ( $t_1 - t_2$ ) mora biti takva da omogući minimalnu prednost u prolasku struje kroz prirodnu nul-točku. To znači da je zbog simetrije dovoljno da razdvajanje kontakata kod prethodno otvorenog pola traje polovicu periode struje, dakle max. 8 - 10 ms. Prekidanje struje  $I_R$  u fazi R je u tom slučaju jednopolno. Ispod su objašnjene sve oznake korištene na slici:

- $I_R, I_S, I_T$  - struje u fazama R, S, T
- 1 i 2 - nul-točke struje u prethodno otvorenom polu (faza R)
- A i B - nul-točke struje u fazama T i S
- T - vrijeme trajanja periode
- $t_0$  - trenutak otvaranja kontakata u prethodno otvorenom polu (faza R)
- $t_1$  - trenutak otvaranja kontakata u ostalim polovima (faze S i T)
- $t_0$  - T/3 - minimalno potrebno vrijeme trajanja prethodnog otvaranja





Slika 8. Princip prekidanja 3-fazne struje u vakuumskom prekidaču s prethodno otvorenim kontaktom u jednom polu (faza R)

## 8. RÖNTGENSKO ZRAČENJE VAKUUMSKIH KOMORA

Röntgensko zračenje se općenito javlja na blizu postavljenim elektrodama pod visokom naponom u vakuumu. U skladu s tim, za vakuumske komore sklopnih aparata postoji standard koji ističe dozvoljenu granicu zračenja i opisuje potrebna ispitivanja za nove komore kojima se provjerava njihova ispravnost. Za provjeru razine vakuuma u vakuumskim komorama u eksploataciji testom dielektrične čvrstoće, standard propisuje ispitivanje sa 75% vrijednosti ispitnog napona, kako bi se izbjegla opasnost od röntenskog zračenja.

Električno polje koje postoji u vakuumu tijekom normalnog rada vakuumskih komora ne proizvodi bilo kakav štetni učinak na osoblje uslijed röntenskog zračenja.

Usprkos toga, proizvođači vakuumskih komora iz zemalja sa strožijim zakonima o zaštiti na radu i zaštiti čovjekova okoliša moraju istaknuti upozorenja o mogućem zračenju röntgenskih zraka u blizini vakuumskih sklopnih aparata. Upozorenja se svode na naljepnice sa znakom opasnosti od zračenja i tekstom upozorenja (Slika 9.): „Ovaj uređaj može isijavati röntgenske zrake ako je napon viši od nazivnog napona dozvoljenog za otvorene kontakte ili ako su kontakti razdvojeni manje od nazivnog hoda. U tom slučaju osoblje mora biti zaštićeno odgovarajućim zaslonima”.

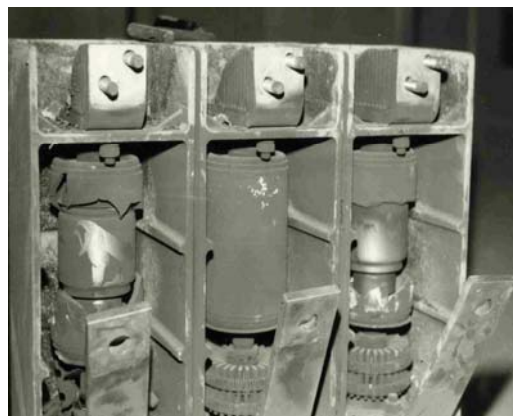


Slika 9. Upozorenje na opasnost od röntgenskih zraka na vakuumskim komorama (Westinghouse)

Röntgenske zrake mogu postati važnija stavka za izučavanje u budućnosti ako (kada) se upotreba vakuuma još više raširi na područje sklopnih aparata visokog i vrlo visokog napona, gdje su prisutna jača električna polja.

Ovdje se može istaknuti još jedna specifična karakteristika vakuumskih sklopnih aparata, a odnosi se na posljedice u slučaju neuspjelog prekidanja strujnog kruga u eksploataciji ili pri ispitivanju. Naime, pri ispitivanju graničnih mogućnosti kod razvoja npr. vakuumskih prekidača, redovito se ide s postepenim povećavanjem parametara (strujnih) do razaranja komora. Učinak tog razaranja je relativno skroman i svodi se na imploziju komora odnosno razaranje kontakata i izolacijskih kućišta. Za razliku od prekidača s realnim medijem, npr. malouljnih prekidača u sličnim uvjetima, kada dolazi do eksplozije i razaranja kompletnog prekidača što ima utjecaj i na njegovu okolinu.

Proizvođači ističu i ovo kao određenu prednost vakuumskih sklopnih aparata pri uspoređivanju sa sklopnim aparatima koji koriste druge medije za gašenje. Ova prednost se ističe prije svega s gledišta zaštite na radu i zaštite okoliša u slučaju događanja u eksploatacijskim uvjetima, jer nema posebno problematičnih posljedica, što nije slučaj s nekim drugim medijima koji služe za gašenje luka u sklopnim aparatima.



Slika 10. Vakuumski prekidači s razorenim komorama nakon neuspjelog gašenja luka u procesu sklapanja

Na Slici 10. prikazani su vakuumski prekidači nazivnog napona 12 kV, nazivne prekidne i uklopne moći 25/63 kA i nazivne struje 1250 A s razorenim vakuumskim komorama.

Slični učinci i posljedice za vakuumske komore nastaju i pri pokušaju sklapanja bez vakuuma.

## 9. ZAKLJUČAK

Specifične pojave na sklopnim aparatima koji koriste vakuumske komore u procesu sklapanja, uglavnom se ne pojavljuju kod drugih sklopnih tehnika.

Praksa je pokazala da takve pojave, kod manje upućenih korisnika, mogu izazivati određene nedoumice i nesigurnost pa i odbojnost pri odlučivanju o uvođenju ovakve opreme u eksploataciju i korištenje.

Cilj ovog članka je da pojašni specifičnosti vakuumske tehnologije kako bi se te možebitne nedoumice otklonile odnosno izbjegle.

## LITERATURA

- [1] R. Milošević, "Mehanizmi električnih sklopnih aparata, osnove teorije i praksa", Graphis, Zagreb 2004.
- [2] Holec, Vacuum circuit breakers 3.10.1.
- [3] Ritter Starkstromtechnik, VL1 Vakuum-Leistungsschalter bis 24 kV und 31,5 kA
- [4] M. Markulin, R. Milošević, D. Jergović, " *Vakuumski prekidači 25 kV za elektrovučni sistem željeznica*", 6. savjetovanje JNK CIGRE, Zbornik radova, Budva, 1987.
- [5] CESI, " Ispitni izvještaji o tipskom ispitivanju vakuumskih prekidača", Milano