

ANALIZA PRENAPONA PRI OPERACIJAMA VAKUUMSKIH SKLOPNIH APARATA I MOGUĆNOSTI ZA NJIHOVO OGRANIČENJE

Ranko Jasika, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” a.d., Beograd, Republika Srbija
Jovan Mrvić, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” a.d., Beograd, Republika Srbija
Ninoslav Simić, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” a.d., Beograd, Republika Srbija
Stefan Obradović, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” a.d., Beograd, Republika Srbija
Goran Lepović, Siemens d.o.o. Beograd, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U radu su analizirani prelazni režimi uzrokovani radom vakuumskih sklopnih aparata. Vakuumski prekidači imaju vrlo dobre prekidne karakteristike, što im omogućuje prekidanje i visokofrekventne komponente struje pri njenom prolasku kroz nulu. Prekidanje visokofrekventnih struja može dovesti do pojave prenapona sa velikim strminama koje prvenstveno naprežu međunavojnu izolaciju transformatora i motora. Da bi se procenila verovatnoća takvih prelaznih procesa i odredio nivo mogućih prenapona, u programskom alatu EMTP/ATP formiran je model vakuumskog prekidača i odgovarajuće mreže na kojima su sprovedene simulacije. Cilj sprovedene analize je donošenje opštih zaključaka o nivoima prenapona koji se mogu javiti pri radu vakuumskih prekidača i pregled mogućih mera za njihovo ograničenje.

Ključne reči: vakuumski prekidač, EMTP/ATP, skloni prenaponi, sečenje struje.

OVERVOLTAGE TRANSIENT ANALYSIS DUE TO VACUUM CIRCUIT BREAKER SWITCHING AND POSSIBILITIES FOR THEIR MITIGATION

SUMMARY

In this paper are presented transient overvoltages caused by vacuum circuit breaker operation. Vacuum circuit breaker have excellent interruption characteristic, and can interrupt the high frequency currents when these passes through zero. The interruption of these high frequency currents can lead to the occurrence of very fast front overvoltages, that could primarily damage the inter-turn insulation of transformers and motors. In order to estimate the probability of such transients and determine the level of possible overvoltages, in program tool EMTP/ATP, circuit breaker model and corresponding network has been developed. The objective of the performed analysis is reaching general conclusions on the levels of overvoltages which may occur during vacuum circuit breaker switching and review possibilities for their mitigation.

Keywords: vacuum circuit breaker, EMTP/ATP, switching overvoltages, current chopping.

¹ Koste Glavinića 8a, Beograd, mob. 064/8243866, ranko.jasika@ieent.org

UVOD

Zbog svoje pouzdanosti, jednostavnosti, malih dimenzija, dobrih prekidačkih karakteristika i dugog životnog veka, vakuumski prekidači predstavljaju najčešće primenjivano rešenje u mrežama srednjeg napona. Jedna od njihovih prednosti je dobro podnošenje velikog broja sklopnih operacija, kako u normalnim pogonskim uslovima tako i pri kvarovima, zbog čega su često zastupljeni u sredjenaponskim pogonima gde se očekuje veliki broj manipulacija prekidačem. Tipičan primer predstavljaju pogoni sa kompenzacijskim prigušnicama, motorima, kondenzatorskim baterijama, za koje su uobičajene operacije uključenja/isključenja na dnevnom nivou. Zbog specifičnosti vakuumskih prekidača, kao što su brzo uspostavljanje dielektrične čvrstoće pri otvaranju kontakata i

moгуćnost prekidanja visokofrekventnih struja, pri njihovom radu često dolazi do nastanka većeg broja uzastopnih ponovnih paljenja luka što dovodi do pojave prenapona velikih strmina koji ugrožavaju međunavojnu izolaciju opreme u postrojenju. Cilj rada je da pokaže efikasnost dodatne zaštite od prenapona izazvanih radom vakuumskog prekidača, u vidu RC prigušivača (eng. *RC snubber*). Tradicionalnom zaštitom, primenom odvodnika prenapona, može se ograničiti njihova amplituda, ali se ne može smanjiti njihova strmina i broj ponovnih proboja u prekidaču, zbog čega je pogodna primena i RC prigušivača. Analiza, efikasnosti prenaponske zaštite sprovedena je primenom programskog alata EMTP/ATP, na formiranom modelu kompenzacijske prigušnice. Takođe, formiran je detaljan model vakuumskog prekidača koji omogućava obuhvatanje specifičnih pojava kao što su ponovno paljenje luka i prekidanje visokofrekventnih struja.

1. PRENAPONI IZAZAVANI RADOM VAKUUMSKIH PREKIDAČA

Predmet analize rada su prenaponi izazvani radom prekidača u slučaju induktivnih opterećenja. Kod induktivnih opterećenja prenaponi izazvani sklopnim operacijama, vezuju se pre svega za prekidanje malih induktivnih struja. Takvoj grupi događaja pripadaju elektromagnetni prelazni procesi koji nastaju pri isključenjima kompenzacijskih prigušnica, neopterećenih energetskih transformatora, neopterećenih motora, kao i isključenja tokom zaleta motora (tzv. Neuspeli start motora).

Zbog specifičnih osobina vakuumskih prekidača, pri njihovim sklopnim operacijama dolazi do pojave prenapona koji mogu biti drugačije prirode od onih koji nastaju kao posledica rada drugih tipova prekidača. Postoje tri osnovna razloga zbog kojih dolazi do pojave prenapona u vakuumskim prekidačima [1], a to su: sečenje struje pri njenom prekidanju, eskalacija napona usled višestrukog paljenja luka u prekidaču pri otvaranju kontakata kao i prepaljenja električnog luka pri zatvaranju kontakata prekidača.

1.1 Prenaponi izazvani sečenjem struje

Pojam sečenja struje (eng. *Cuurent chopping*) odnosi se na pojavu prekidanja struje pogonske učestanosti pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Razdvajanjem kontakata prekidača uspostavlja se električni luk. U trenutku kada struja dostigne niske vrednosti (nekoliko ampera) luk postaje nestabilan tako da dolazi do njegovog gašenja i prisilnog prekidanja struja pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Sečenjem struje, u induktivnom opterećenju, ostaje zarobljena magnetna energija, koja se, oscilatornim prelaznim procesom, transformiše u elektrostatičku energiju kapaciteta na strani opterećenja. Kao posledica oscilatornog procesa i razmene energije javljaju se prenaponi značajnih amplituda. Na osnovu jednačine energetskog balansa u trenutku sečenja struje mogu se proceniti maksimalne vrednosti prenapona [2]:

$$\frac{1}{2} C_t u_m^2 = \frac{1}{2} C_t u_t^2 + \frac{1}{2} L_t i_{ch}^2 \eta_m \Rightarrow u_m = \sqrt{u_t^2 + \frac{L_t}{C_t} i_{ch}^2 \eta_m} \quad (1)$$

gde su: i_{ch} – struja sečenja, u_t – napon tereta u trenutku sečenja, L_t i C_t – induktivnosti i kapacitivnosti tereta, η_m – stepen razmene magnetne energije.

Na osnovu datog izraza se može zaključiti da vrednosti prenapona zavise od nivoa struje sečenja. Kod vakuumskih prekidača nivo sečenja struje zavisi pre svega od vrste materijala kontakata, a veoma malo od parametara mreže za razliku od drugih tipova prekidača. Ranije tehnologije izrade kontaktnih elektroda su izazivale relativno visoke struje sečenja što je vodilo pojavi visokih prenapona. Današnji vakuumski prekidači izazivaju znatno niže sečenje struje, manje od 5A.

1.2 Eskalacija napona tokom ponovnog paljenja luka

Prekidanjem struje, sa ili bez njenog sečenja, između kontakata prekidača uspostavlja se prelazni povratni napon. Ukoliko do prekidanja struje dođe u trenutku kada je razmak između kontakata previše mali, vrednost povratnog napona može prevazići dielektričnu čvrstoću međukontaktne zazor, usled čega dolazi do proboja u prekidaču i ponovnog paljenja luka (eng. *reignition*). Ponovno uspostavljanje luka praćeno je pojavom oscilatornog prelaznog procesa koji teži da izjednači napone na kontaktima prekidača. Struja luka osciluje sa frekvencijom od reda 50 - 1000 kHz [2]. Zbog svojih odličnih prekidačkih karakteristika vakuumski prekidači mogu da prekinu visokofrekventnu struju luka, usled čega se ponovo uspostavlja prelazni povratni napon veće strmine i amplitude od prethodnog. Ukoliko razmak kontakata i dalje nije dovoljan, opet dolazi do ponovnog proboja dielektrične čvrstoće prekidača i uspostavljanja luka. Zavisno od trenutka isključenja, opisani proces se može sukcesivno ponavljati i nekoliko desetina puta što vodi znatnom uvećavanju amplitude prenapona. Osim visoke amplitude prenapona, koja se može ograničiti primenom odvodnika prenapona, visoka strmina prenapona značajno ugrožava međunavojnu izolaciju opreme, što zahteva dodatne mere zaštite.

1.3 Prenaponi izazvani pretpaljenjem luka

Prilikom zatvaranja prekidača, usled primicanja njegovih kontakata smanjuje se i dielektrična čvrstoća međukontaktnog zazora. Zavisno od trenutka zatvaranja prekidača, odnosno od trenutne vrednosti napona na prekidaču može doći do pojave preskoka pre nego što se kontakti sastave. Ovaj fenomen se naziva pretpaljenje električnog luka (eng. *prestriking*). Proces pretpaljenja luka prilikom uključenja prekidača identičan je procesu ponovnog paljenja luka pri njegovom isključenju. Međutim, pri pojavi višestrukih pretpaljenja luka amplituda povratnog napona postepeno opada, tako da su manje kritični od višestrukih ponovnih paljenja luka.

2. MODEL VAKUUMSKOG PREKIDAČA

U tradicionalnim analizama sklopnih prenapona prekidači se najčešće modeluju kao "idealni", pri čemu se primenjuje statistički pristup prema kome se varira trenutak isključenja/uključenja uz uvažavanje vremenskog "rasipanja" između polova prekidača. Međutim, takvim modelom ne mogu se obuhvatiti pojave u prekidaču opisane u prethodnom poglavlju, već je potrebno formirati znatno složeniji model koji će uvažiti pojavu sečenja struje, ponovnog paljenja luka kao i prekidanja visokofrekventne struje. Egzaktan model prekidača bi zahtevao eksperimentalno određivanje relevantnih parametara (brzine uspostavljanja dielektrične čvrstoće, nivo struje sečenja, itd.) potrebnih za njegovo modelovanje, što najčešće nije moguće, pri tome su parametri prekidača kao i pojave u njemu stohastičkog karaktera i teško se mogu tačno odrediti. Prema tome, imajući u vidu da se studije prenaponske zaštite baziraju na statističkim tehnikama (Monte Karlo simulacije), formiran je stohastički model vakuumskog prekidača koji se bazira na slučajnom izboru parametara prekidača, iz opsega tipičnih vrednosti, u svakoj iteraciji statističkog procesa. Kako je već pomenuto, model vakuumskog prekidača treba da obuhvati različite fenomene koji se javljaju u realnom prekidaču pri sklopnim operacijama. Da bi se to postiglo modelom je potrebno obuhvatiti:

- sečenje struje pogonske učestanosti pre njenog prolaska kroz nulu,
- brzinu uspostavljanja dielektrične čvrstoće između kontakata,
- mogućnost prekidanja visokofrekventne struje kroz prekidač,
- slučajno vreme gorenja luka.

2.1 Modelovanje sečenja struje pogonske učestanosti

Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, vakuumski luk koji pri struji malog intenziteta postaje vrlo nestabilan tako da može doći do njegovog gašenja i prekidanja struje pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Vrednost struje sečenja kod vakuumskih prekidača zavisi, pre svega, od materijala od koga su napravljeni kontakti prekidača. Brojna eksperimentalna istraživanja pokazala su da nivo sečenja struje, pored materijala od koga su izrađeni kontakti, zavisi i od amplitude struje opterećenja koja se prekida kao i njene učestanosti. Zbog toga su u literaturi često primenjuje empirijski izraz koji daje vezu između struje sečenja i navedenih parametara [3]:

$$I_{ch} = (2\pi f |I| \alpha \beta)^{(1-\beta)^{-1}} \quad (2)$$

gde su: f – frekvencija struje koja se prekida, $|I|$ – amplituda struje opterećenja u toku poslednje poluperiode, α i β – koeficijenti čija vrednost zavisi od vrste materijala kontakata, veličine kontakata i međukontaktnog rastojanja. Tipične vrednosti koeficijenata su: $\alpha = 6.2 \cdot 10^{-16}$ i $\beta = 14.2$.

Vrednosti struje sečenja dobijene izrazom (2) kreću se u opsegu od 3A do 8A. Ukoliko je struja opterećenja manja od datih vrednosti do sečenja dolazi odmah. S obzirom da je nivo struje sečenja slučajnog karaktera, u statističkim analizama struja sečenja je varirana, prema Gausovoj raspodeli verovatnoće, pri čemu srednja vrednost struje odgovara vrednosti dobijenoj izrazom (2) uz standardnu devijaciju od 10%.

2.2 Modelovanje brzine uspostavljanja dielektrične čvrstoće između kontakata prekidača

Za razliku od drugih medijuma za gašenje luka (npr. SF₆ gas, ulje) čija dielektrična čvrstoća približno linearno zavisi od razmaka između kontakata, u slučaju vakuumskih prekidača ova zavisnost je nelinearna, naročito pri većim razmacima između elektroda, što u najvećoj meri ograničava njihovu primenu na visokom naponu. U zavisnosti od vrednosti naznačenog napona, hod pokretnog kontakta vakuumskog prekidnog elementa varira od 6 do 24 mm za naponske nivoe od 12 do 37.5 kV. Gotovo sve pojave ponovnog paljenja luka prilikom otvaranja kontakata prekidača javljaju se tokom njihovog razmaka do reda nekoliko milimetara, kao i sve pojave pretpaljenja luka tokom zatvaranja kontakata. S obzirom da se svi procesi značajni za analizu prenapona pri radu

vakuumskih prekidača dešavaju pri veoma malim razmacima između kontakata, uobičajeno je da se karakteristika dielektrične čvrstoće predstavlja jednim linearnim segmentom. Pomenuta linearna karakteristika se može predstaviti sledećim izrazom [1, 4]:

$$U_d(t) = A(t - t_0) + B \quad (3)$$

gde je: t_0 – trenutak razdvajanja kontakata, A – stepen porasta dielektrične čvrstoće, B – trenutna vrednost napona na prekidaču. Tipične vrednosti parametara A i B za vakumske prekidače date su u Tabeli 1.

Kada dođe do prekidanja struje, između kontakata prekidača javlja se povratni napon koji je određen konfiguracijom mreže sa obe strane prekidača. S druge strane, sa razdvajanjem kontakata, raste dielektrična čvrstoća odnosno podnosivi napon prekidača. Ako vrednost povratnog napona premaši dielektričnu čvrstoću uspostavljenu između kontakata, definisanu izrazom (3), luk se ponovo uspostavlja i prekidač opet provodi struju. Tokom zatvaranja kontakata prekidača proces je obrnut.

2.3 Modelovanje sečenja visokofrekventne struje

Kao što je već rečeno, pri pojavi proboja u prekidaču i ponovnom paljenju električnog luka javljaju se viskofrekventne (VF) komponente struje, koje se superponiraju na struju pogonske učestanosti. Ukoliko je amplituda viskofrekventne struje veća od trenutne vrednosti struje pogonske učestanosti, dolazi do prolaska kroz nulu struje koja teče kroz prekidač. Vakuumski prekidači zbog svojih odličnih prekidačkih karakteristika i brzog uspostavljanja dielektrične čvrstoće mogu da prekinu viskofrekventnu struju pri njenom prolasku kroz nulu i time ugase luk. Ključni faktor koji utiče na to da li će doći do prekidanja struje jeste njena strmina pri prolasku kroz nulu. Do prekidanja struje može doći samo ukoliko je strmina struje (di/dt) manja od kritične vrednosti (eng. *critical slope*). Strmina, odnosno učestanost viskofrekventne struje zavise od konfiguracije kola koje se prekida, njenih L-C parametara, dok kritična strmina struje pri kojoj je moguć prekid zavisi od karakteristika samog prekidača. Prekidači koji imaju veću vrednost kritične strmine struje izloženi su većem broju prekidanja VF struje i većem broju ponovnih paljenja luka, usled čega se javlja već broj veoma strmih prenapona. S obzirom da strmina VF struja opada sa vremenom, ukoliko do prekidanja VF struje ne dođe pri njenom prvom prolasku kroz nulu, do prekidanja može doći pri nekom od narednih prolazaka ukoliko vrednost di/dt padne ispod kritične. Prema najčešće primenjivanom pristupu u modelovanju prekidačkih sposobnosti vakuumskih prekidača, koji se mogu sresti u literaturi, kritična vrednost strmine di/dt pri kojoj je moguć prekid zavisi od rastojanja između kontakata u trenutku prekidanja VF struje i može se odrediti izrazom [1, 4]:

$$di/dt = C(t - t_0) + D \quad (4)$$

gde su: t_0 – trenutak razdvajanja kontakata, C i D – konstante koje zavise od tipa prekidača. Tipične vrednosti parametara C i D za vakumske prekidače date su u Tabeli 2.

U statističkim analizama vrednosti parametara su varirane, prema Gausovoj raspodeli verovatnoće, pri čemu srednja vrednost parametara odgovara onim iz tabele 2, uz standardnu devijaciju od 10%.

A [V/μs]	B [V]
2	0
20	0
30	1000
50	0

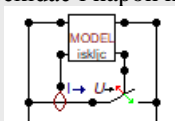
C [A/μs ²]	D [A/μs]
-0.034	255
0	100
0	600
0.31	155

2.4 Vreme gorenja luka u prekidaču

Nakon razdvajanja kontakata, struja kroz prekidač nastavlja da teče preko luka formiranog u međukontaktom prostoru i prekida se tek pri njenom prolasku kroz nulu. Trenutak otvaranja kontakata prekidača u odnosu na trenutnu vrednost struje kroz prekidač, od ključnog je značaja za uspešno prekidanja struje. Ukoliko do razdvajanja kontakata dođe u trenutku kada je vrednost struje bliska nuli, luk će se ugasi pri jako malom rastojanju između kontakata. Zbog premalog rastojanja između kontakata i nedovoljne dielektrične čvrstoće, prelazni povratni napon koji se javlja nakon prekidanja struje dovešće do proboja u prekidaču i ponovnog uspostavljanja luka. S druge strane ako do razdvajanja kontakata dođe u trenutku kada je struja kroz prekidač tek prošla kroz nulu, ali je dovoljno velika da ne dođe do trenutnog prekidanja, luk će nastaviti da gori praktično celu poluperiodu napona pogonske učestanosti (~10 ms) sve do prolaska struje kroz nulu. Za to vreme kontakti prekidača će se maksimalno razmaći, i uspostaviće se dielektrična čvrstoća dovoljno velika da spreči ponovno paljenje luka. Trenutak isključenja prekidača je slučajnog karaktera, osim ako nije u pitanju "inteligentni prekidač" kojem kontroler određuje optimalni trenutak isključenja, zbog čega je u statističkoj analizi usvojeno vreme isključenja varirano prema uniformnoj raspodeli u okviru jedne periode signala struje.

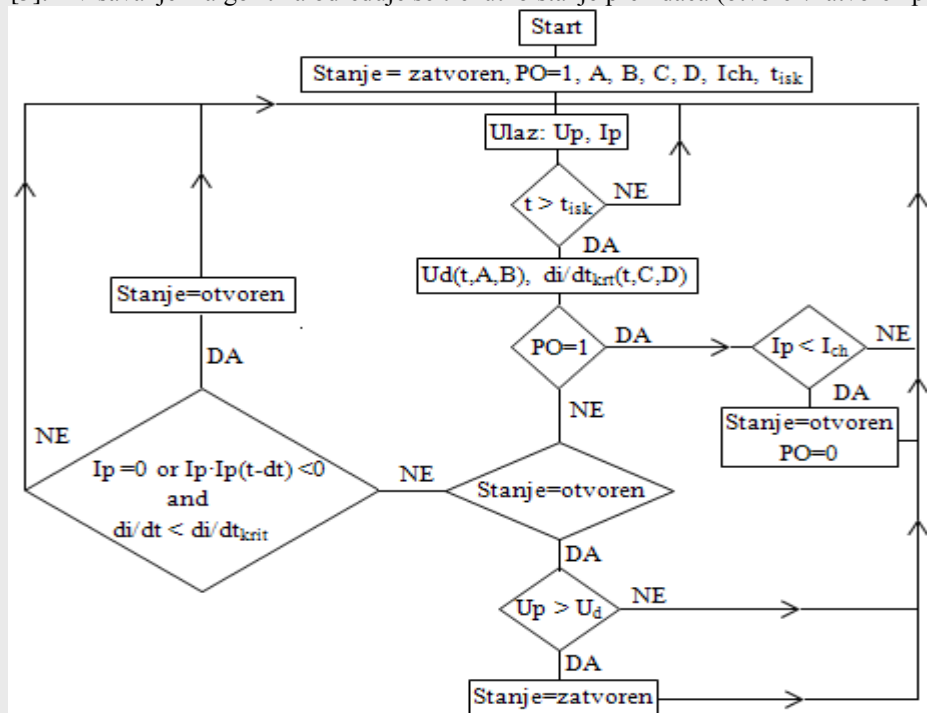
3. IMPLEMENTACIJA MODELA VAKUUMSKOG PREKIDAČA U EMTP/ATP

Model prekidača opisan u prethodnom poglavlju implementiran je u programskom alatu EMTP/ATP, primenom MODELS komponente, koja upravlja radom "idealnog" prekidača, kao što je prikazano na slici 1. Ulazne veličine MODELS komponente su struja kroz prekidač i napon na njegovim krajevima.



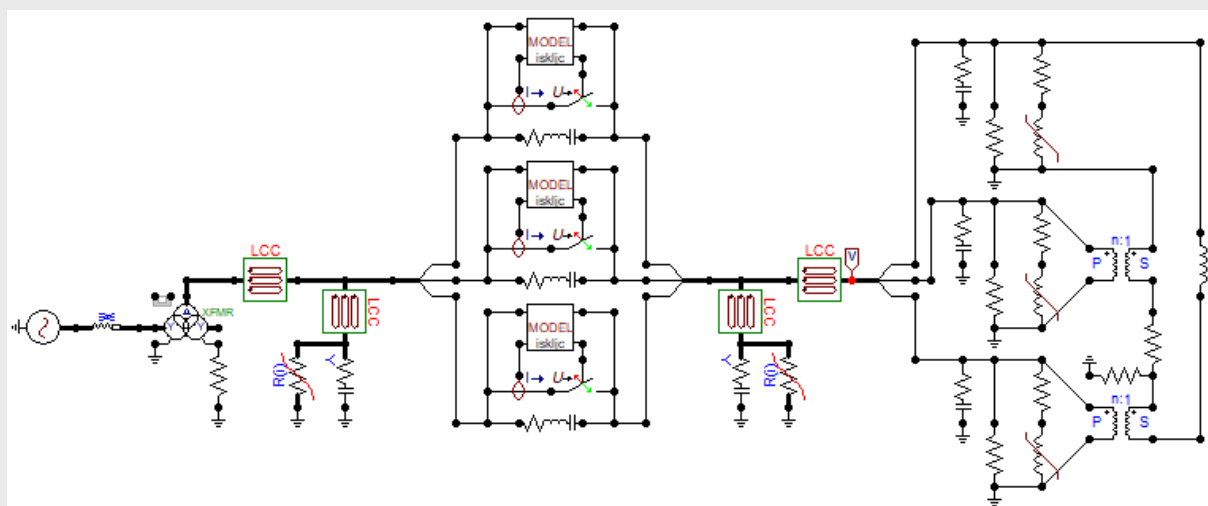
Slika 1. Model vakuumskog prekidača u programskom alatu EMTP/ATP

Unutar MODELS komponente sadržan je programski kod prema kome se izvršava algoritma čiji je blok dijagram dat na slici 2 [5]. Izvršavanjem algoritma određuje se trenutno stanje prekidača (otvoren/zatvoren položaj).



Slika 2. Blok dijagram algoritma prema kojem radi prekidač

Tako formirani model vakuumskog prekidača iskorišćen je za analizu prenapona pri isključenju kompenzacijske prigušnice snage 40MVA priključene na tercijar transformatora 400/132/33 kV. Na slici 3 prikazan je formirani model kompenzacijske prigušnice i prekidača. Cilj analize bio je da se sagleda uticaj dodatne prenaponske zaštite u vidu RC snabera, postavljenih sa obe strane prekidača kao što je prikazano na slici 3.



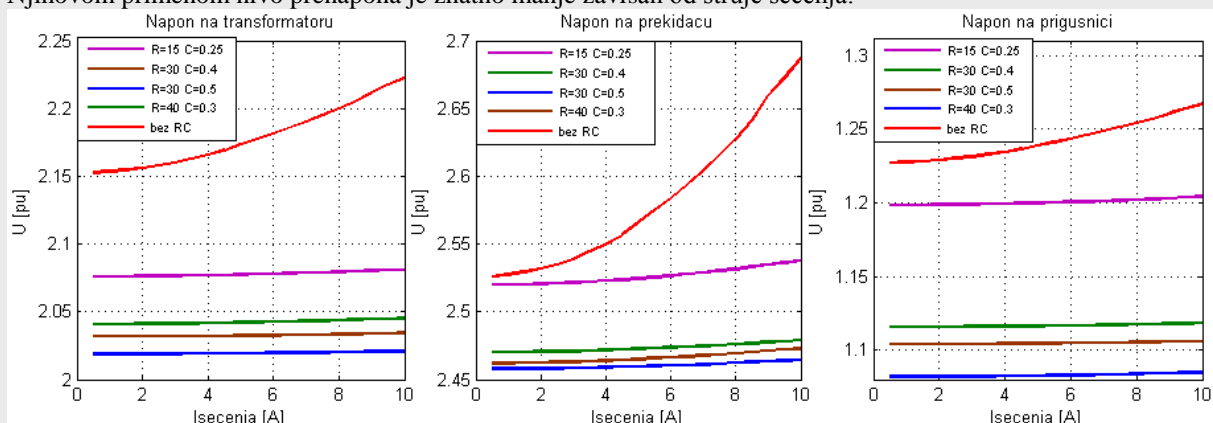
Slika 3. ATP model za analizu prenapona

4. REZULTATI ANALIZA PRENAPONA IZAZVANIH RADOM PREKIDAČA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati analize prenapona pri isključenju kompenzacijske prigušnice priključene na tercijar energetskog transformatora, prema modelu opisanom u prethodnom poglavlju. Pri tome je analiziran uticaj RC snabera na dobijene prenapone. Posmatran je uticaj nekoliko tipičnih kombinacija parametara RC snabera: $R=15\Omega$, $C=0.25\mu\text{F}$; $R=40\Omega$, $C=0.3\mu\text{F}$; $R=30\Omega$, $C=0.4\mu\text{F}$; $R=30\Omega$, $C=0.5\mu\text{F}$. Sprovedena analiza prenapona podeljena je u dve celine: analiza prenapona pri isključenju prekidača bez ponovnog paljenja luka u njemu, i analiza prenapona pri isključenju prekidača sa ponovnim paljenjem luka u njemu.

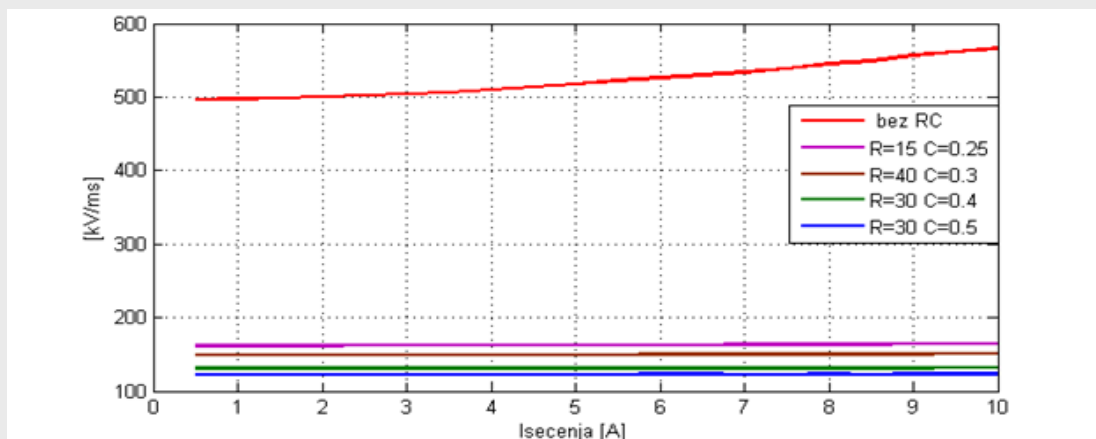
4.1 Analiza prenapona pri isključenju prekidača bez ponovnog paljenja luka u njemu

Ukoliko je vreme gorenja luka u prekidaču dovoljno dugo, tako da je vrednost uspostavljene dielektrične čvrstoće između kontakata veća od prelaznog povratnog napona na prekidaču, dolazi do uspešnog prekidanja struje bez ponovnih paljenja luka. U ovom slučaju nivo prenapona zavisi samo od vrednosti struje sečenja pri njenom prekidanju. U cilju određivanja nivoa prenapona, sprovedena je sistematična analiza u kojoj je varirana struja sečenja (do nivoa od 10 A) pri čemu je odabrano vreme isključenja tako da ne dolazi do proboja u prekidaču. Posmatrani su naponi na tercijaru transformatora i kompenzacijskoj prigušnici kao i prelazni povratni napon na prekidaču, za različite kombinacije RC snabera. Rezultati analize prikazani su na slici 4. Može se uočiti da primena pogodno izabranog RC snabera može sniziti amplitudu prenapona, kao i prelaznog povratnog napona na prekidaču za oko 10-20%. Pri tome je uticaj RC snabera izraženiji pri većim vrednostima struje sečenja. Njihovom primenom nivo prenapona je znatno manje zavisn od struje sečenja.



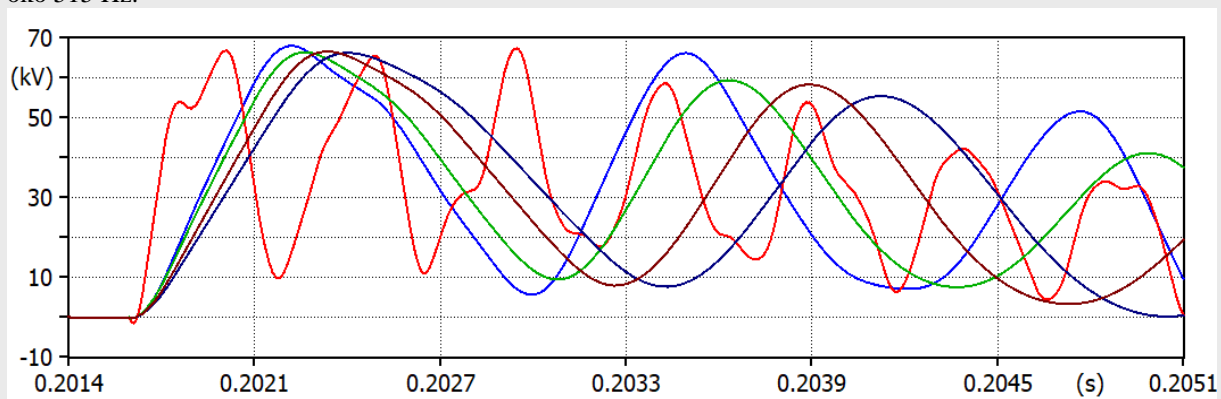
Slika 4. Relativne vrednosti prenapona na transformatoru, prekidaču i kompenzacijskoj prigušnici u funkciji struje sečenja

Primarna uloga RC snabera nije u smanjenju amplitude prenapona već u smanjenju njihove strmine, čime se smanjuje i brzina uspostavljanja povratnog napona na prekidaču. Na taj način povećava se mogućnost uspešnog prekidanja struje bez ponovnog paljenja luka. U cilju utvrđivanja uticaja RC snabera na brzinu uspostavljanja povratnog napona na prekidaču, sprovedena je sistematična analiza u kojoj je varirana struja sečenja (do nivoa od 10 A), za različite kombinacije RC snabera. Rezultati analize prikazani su na slici 5. Može se uočiti da se primenom odgovarajućeg RC snabera može značajno ublažiti brzina uspostavljanja povratnog napona (strmina), čak 500%. Takođe, zavisnost brzine uspostavljanja povratnog napona od struje sečenja nije izražena.



Slika 5. Brzina uspostavljanja povratnog napona prekidača u funkciji struje sečenja

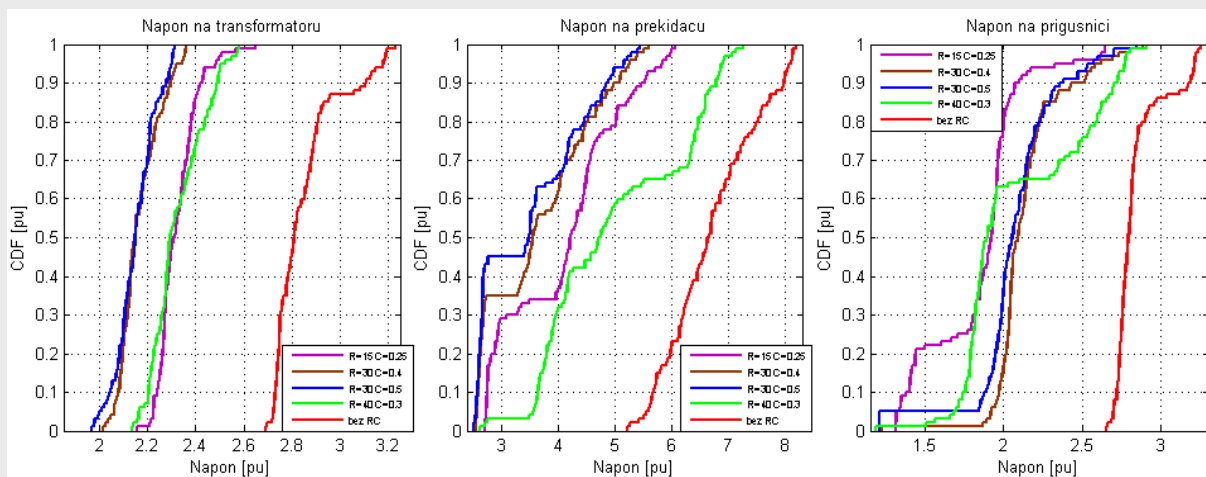
Primenom RC snabera, kojima se smanjuje brzina uspostavljanja povratnog napona, uvećava se mogućnost uspešnog prekidanja struje zbog smanjenja minimalnog potrebnog vremena tokom koga je neophodno da gori luk. Bez primene RC snabera minimalno vreme gorenja luka tokom koga ne dolazi do proboja u prekidaču iznosi približno 2 ms, dok se primenom RC snabera ($R=30\Omega$, $C=0.5\mu\text{F}$) vreme smanjuje za 30%, na 1.4 ms. Uticaj primene RC snabera ilustrovan je na slici 6, gde je prikazan talasni oblik povratnog napona na prekidaču pri struji sečenja od 5A. Pored smanjenja strmine, primenom RC snabera smanjuje se i frekvencija oscilatornog prelaznog procesa koji nastaje prekidanjem struje. Približna frekvencija povratnog napona bez primene RC snabera je približno 2060 Hz, dok se primenom RC snabera ($R=30\Omega$, $C=0.5\mu\text{F}$) frekvencija redukuje za 75% na oko 515 Hz.



Slika 6. Prelazni povratni napon na prekidaču za različiti kombinacije RC snabera (crvena: bez RC snabera; plava: $R=15, C=0.25$; zelena: $R=40, C=0.3$; braon: $R=30, C=0.4$; crna: $R=30, C=0.5$)

4.2 Analiza prenapona pri isključenju prekidača sa ponovnim paljenjem luka

Ukoliko je vreme gorenja luka suviše kratko, tako da prelazni povratni napon premašuje uspostavljenu dielektričnu čvrstoću između kontakata prekidača dolazi do ponovnog paljenja luka u prekidaču koje je praćeno veoma brzim prenaponima. U cilju određivanja prenapona koji nastaju kao posledica ponovnih paljenja luka, sprovedena je statistička analiza (Monte Karlo simulacija) u kojoj je primenjen stohastički model vakuumnog prekidača opisan u prethodnom poglavlju, koji omogućava variranje njegovih ključnih parametara (nivo sečenja struje, brzina uspostavljanja dielektrične čvrstoće, vreme gorenja luka, mogućnost prekidanja visokofrekventnih struja). Posmatrani su naponi na tercijaru transformatora, kompenzacijskoj prigušnici kao i prelazni povratni napon na prekidaču. Rezultati analize prikazani su na slici 7, gde je predstavljena kumulativna raspodela (CDF) dobijenih prenapona. Može se uočiti da ponovno paljenje luka dovodi do značajnih povećanja prenapona, s tim da odvodnici ograničavaju njihov nivo na oko 3.4 pu. S druge strane, primena odgovarajućeg RC snabera smanjuje amplitudu prenapona na nivo niži od nivoa reagovanja odvodnika tako njihova primena predstavlja veoma efikasnu dodatnu prenaponsku zaštitu.



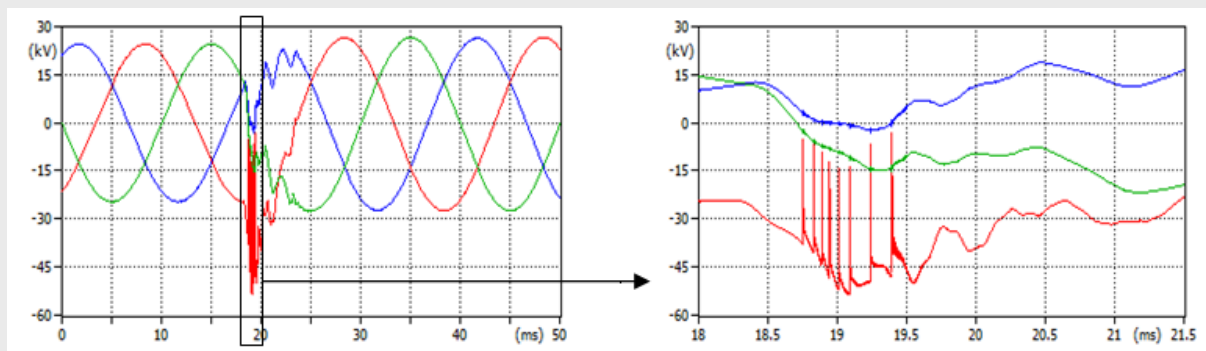
Slika 7. Kumulativna raspodela prenapona na transformatoru, prekidaču i prigušnici

Rezultati statističke analize dati su i u Tabeli 3, gde su prikazane vrednosti prenapona na transformatoru, prigušnici i povratni napon na prekidaču (TRV) koje mogu biti prevaziđene sa verovatnoćom manjom od 2% kao i srednja vrednost strmine prenapona (RRV) koji nastaje probojem u prekidaču, koji naprežu međunavojnu izolaciju transformatora i prigušnice. Može se uočiti da, osim pozitivnog uticaja na amplitudu prenapona RC snaberi smanjuju strminu brzih prenapona koji nastaju nakon proboja u prekidaču. Značajna prednost primene RC snabera pored smanjenja strmine prenapona je u smanjenju broja proboja u prekidaču zahvaljujući skraćanju potrebnog minimalnog vremena gorenja luka u prekidaču. Takođe, ukoliko dođe do proboja u prekidaču, zahvaljujući prigušenju prelaznog procesa, smanjuje se broj uzastopnih ponovnih paljenja luka koji vode eskalaciji napona.

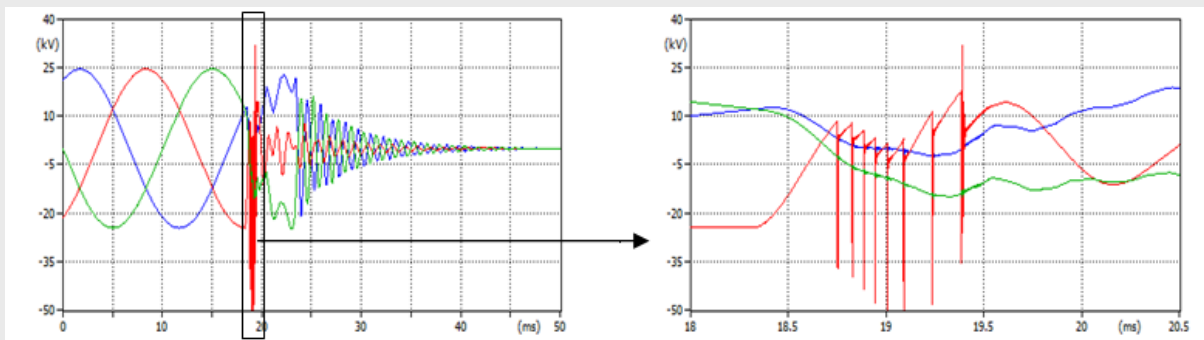
Tabela 3. Rezultati statističke analize

R [Ω]	C [μF]	Transformator		Kompenzacijska prigušnica		TRV
		$U_{2\%}$ [kV]	RRV [kV/μs]	$U_{2\%}$ [kV]	RRV [kV/μs]	$U_{2\%}$ [kV]
-	-	3.2	49.5	3.2	86.6	8.2
15	0.25	2.5	35.6	2.5	61.1	6.0
30	0.5	2.3	43.3	2.6	80.0	5.3
30	0.4	2.4	41.4	2.7	77.3	5.4
40	0.3	2.6	42.5	2.8	78.2	7.1

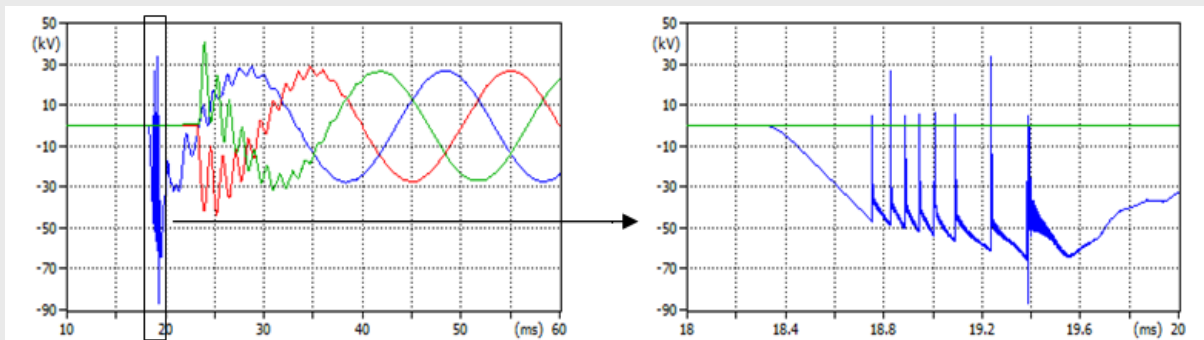
Na slikama 8, 9 i 10 prikazani su tipični talasni oblici napona na tercijaru transformatora, kompenzacijskoj prigušnici kao i povratni napon na prekidaču, u slučaju pojave višestrukih ponovnih paljenja luka u prekidaču. Prikazan je primer kada postoji snaber sa parametrima ($R=30\Omega$, $C=0.5\mu F$) dok je vreme gorenja luka 1.2 ms.



Slika 8. Napon na tercijaru transformatora



Slika 8. Napon na kompenzacijskoj prigušnici



Slika 9. Napon na prekidaču

5. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana pojava prenapona prilikom isključenja kompenzacijske prigušnice priključene na tercijar energetskog transformatora, na modelu formiranom u programskom alatu EMTP/ATP. Da bi se sagledao uticaj vakuumnog prekidača na pojavu prenapona formiran je stohastički model prekidača koji omogućava variranje njegovih ključnih parametara: nivo sečenja struje, brzina uspostavljanja dielektrične čvrstoće, vreme gorenja luka, mogućnost prekidanja visokofrekventnih struja. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da ponovna paljenja luka u prekidaču izazivaju značajno uvećanje prenapona, koji odvodnici prenapona ograničavaju na vrednosti od približno 3.4 pu, dok zaštita u vidu RC snabera dodatno smanjuje njihovu amplitudu za oko 20%. Takođe, primenom RC snabera značajno se smanjuje mogućnost pojave proboja u prekidaču, zahvaljujući skraćanju potrebnog minimalnog vremena gorenja luka u prekidaču. Ukoliko dođe do proboja njihovom primenom smanjuje se broj uzastopnih paljenja luka kao i strmina veoma brzih prenapona koji tom prilikom nastaju i koji značajno naprežu međunavojnu izolaciju opreme. Prema tome, adekvatna prenaponska zaštita pored odvodnika prenapona svakako treba da sadrži i odgovarajući izabrane RC snabere.

ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru projekta TR 33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora i primenom novih metoda ispitivanja i daljinskog nadzora” i projekta III 44006 “Razvoj novih informaciono-komunikacionih tehnologija, korišćenjem naprednih matematičkih metoda, sa primenama u medicini, energetici, telekomunikacijama, e-upravi i zaštiti nacionalne baštine“ koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

6. LITERATURA

1. B. Kondala Rao, Gopal Gajjar, 2006, "Development and application of vacuum circuit breaker model in electromagnetic transient simulation", "Ponjer India Conference IEEE".
2. CIGRE, Technical Brochure 50, 1995, WG 13.02, "Interruption of Small Inductive Currents", Paris.
3. R. P. P. Smeets, "Low-current behaviour and current chopping of vacuum arcs," PhD, Technical University of Eindhoven, Eindhoven, The Netherland, 1987.
4. Mohamed A. Ebrahim, Tamer Elyan, Fady Wadie, Mousa A. Abd-Allah, 2017, "Optimal design of RC snubber circuit for mitigating transient overvoltage on VCB via hybrid FFT/Wavelet Genetic approach", Electric Power System Research, Volume 143, page 451-461.
5. M. Popov, 2002, "Switching three-phase distribution transformers with a vacuum circuit breaker analysis of overvoltages and the protection of the equipment", PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
6. P. Vukelja, R. Naumov, J. Mrvić, D. Hrvic, 2010, "Prelazni naponi i struje u mrežama 35 kV, 20 kV, 10 kV i 6 kV – eksperimentalna istraživanja", monografija.
7. ATP - EMTP: Bonneville Power Administration (BPA) Electro Magnetic Transient Program (EMTP) and ATPDraw –Alternative Transient Program (ATP) graphical pre-processor Copyright. (e-mail: canam@emtp.org), (www.eeug.org)
8. IEC TR 60071-1: Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules. Edition 2005.
9. Andrew R. Hileman, 1999, "Insulation coordination for power systems", Edited by Marcel Dekker, Inc.
10. IEEE Std C57.142™-2010 IEEE Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformers, Switching Device, and System Interaction
11. David F. Peelo, 2014, "Current Interruption transients calculation" John Wiley and Sons Ltd ISBN: 978-1-118-60047-4.
12. Paul G. Slade, 2008, "The Vacuum Interrupter" Taylor & Francis Group