

# Simulacije sinhronog prekidanja malih induktivnih i kapacitivnih struja

Lena Zec  
Elektrotehnički fakultet  
Univerzitet u Beogradu  
Beograd, Srbija  
lenazec9@gmail.com

Jovan Mikulović  
Elektrotehnički fakultet  
Univerzitet u Beogradu  
Beograd, Srbija  
mikulovic@etf.bg.ac.rs

*Sažetak*— U ovom radu je izvršena analiza i prikazane su simulacije isključivanja malih induktivnih i kapacitivnih struja u elektroenergetskim sistemima. Prekidanje malih induktivnih struja spada u red sklopnih operacija koje mogu izazvati značajne prenapone. Pod sinhronim prekidanjem struje se podrazumjeva pogađanje trenutka prekidanja u odnosu na sinusoidu struje ili napona. Cilj sinhronih sklopnih operacija je smanjenje naponskog ili strujnog naprezanja pri sklapanju induktivnih i kapacitivnih struja i uklapanju dugih vodova.

*Ključne riječi*- sinhrono prekidanje struje; induktivne struje; kapacitivne struje; prenaponi; smanjenje naponskog ili strujnog naprezanja

## I. UVOD

Skoro svi prekidači koji se u današnje vrijeme koriste su mehanički prekidači, što znači da struju prekidaju mehaničkim odvajanjem kontakata. Pri odvajanju kontakata dolazi do pojave električnog luka, koga je potrebno ugasiti te osigurati od ponovnog paljenja. Količina oslobođene toplote je toliko velika da može da uzrokuje nagaranje i zavarivanje kontakata, te oštećenja izolacije ili drugih komponenti. Na samom početku smatralo se da otvaranjem prekidača u trenutku prvog prolaska struje kroz nulu može se u potpunosti izbjeći pojava električnog luka u međukontaktom prostoru, pri čemu je probojni napon između kontakata veći od povratnog napona. Da bi se ovo postiglo neophodna je velika preciznost i brzina otvaranja kontakata, koja se teško ostvaruje u praksi. Pod sinhronim prekidanjem struje se podrazumjeva pogađanje trenutka uklopa ili isklopa u odnosu na sinusoidu struje ili napona. Sinhrono sklapanje i njegovo korištenje na visokim i djelimično na srednjim naponskim nivoima imaće značajnu primenu u budućnosti. Smatra se da će se prvo koristiti za sklapanje prigušnica, motora, transformatora, kondenzatora, drugih vodova i struja kratkih spojeva sa izražajnom jednosmjernom komponentom.

Cilj ovog rada je detaljna analiza isključivanja malih induktivnih struja i kapacitivnih struja korišćenjem računarskih simulacija. Prekidanje malih induktivnih struja spada u red sklopnih operacija koje mogu izazvati značajne prenapone [1]-[3]. Prekidna struja je mala u poređenju sa nazivnim prekidnim strujama kratkog spoja prekidača. Osnovni problem se vezuje

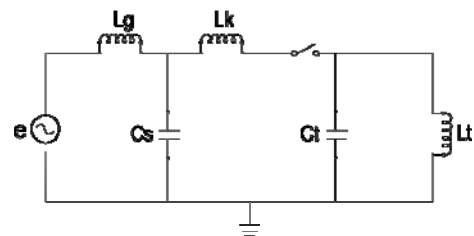
ne na uspješnost prekidanja, već na visinu sklopnih prenapona koji se mogu pojaviti tokom prekidanja.

Svi tipovi prekidača kod manjih vrijednosti struja forsiraju prijevremeni prolazak struje kroz nulu, pri čemu se oslobađa energija u induktivnom opterećenju stvarajući prenapone. Važnu ulogu u stvaranju prenapona imaju ograničena dielektrična čvrstoća međukontaktog razmaka prekidača, kao i sposobnost prekidača da prekida visokofrekventne struje.

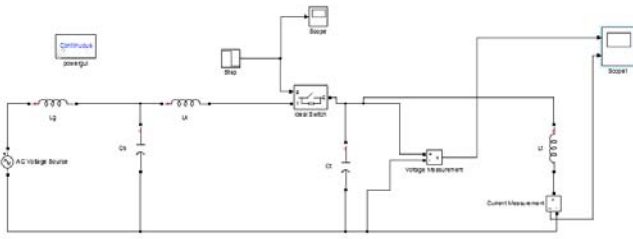
Male kapacitivne struje se javljaju u slučaju sklapanja neopterećenih dalekovoda (dalekovodi u praznom hodu) ili kablova, te prilikom sklapanju kondenzatorskih baterija [1]. Pojave koje se dešavaju pri isklapanju neopterećenih dalekovoda ili kablova vrlo su slične pojavama pri prekidanju malih kapacitivnih struja kondenzatorskih baterija. Zbog toga se proučavanje prekidanja kapacitivnih struja svodi na analizu pojava pri sklapanju kondenzatorskih baterija [1].

## II. ISKLJUČIVANJE MALIH INDUKTIVNIH STRUJA

Tipične sklopne operacije koje dovode do visokih prenapona pri isključenju malih induktivnih struja su: isključenje struje magnećenja transformatora u praznom hodu, isključenje struja visokonaponskih prigušnica, isključenje transformatora opterećenog prigušnicom, isključenje visokonaponskih motora u zaletu i isključenje slabo opterećenih motora. U ovom radu se analizira prekidanje malih induktivnih struja pri isključenju transformatora koji je radio u režimu praznog hoda. Snaga transformatora je 30 MVA i odnosa transformacije 121/36.5 kV/kV. Usvaja se da prekidač može trenutno da prekida struju od 10 A. Na sl. 1 prikazana je monofazna zamjenska šema, a na sl. 2 je dat model u Simulinku za prekidanje malih induktivnih struja, respektivno.



Slika 1. Monofazna zamjenska šema pri prekidanju malih induktivnih struja [3]



Slika 2. Simulink model prekidanja malih induktivnih struja

U simulaciji su korišćeni sljedeći parametri:  $C_1=10^{-6}$  F,  $L_k=1$  mH,  $C_t=10^{-8}$  F i  $L_t=51.86$  H. Maksimalna vrijednost struje praznog hoda transformatora je  $I_{mph}=6,07$  A.

Na osnovu prethodne slike, nakon otvaranja kontakata prekidača ima se kolo za koje važe sljedeće jednačine:

$$u_c(t) = -L_t \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

$$i(t) = C_t \frac{du_c(t)}{dt} \quad (2)$$

gdje su početni uslovi određeni uglom komutacije  $\varphi$ :  $u(0) = U_{C0} = I \cos \varphi$ ,  $i(0) = I_0 = I \sin \varphi$ .

Zahvaljujući primjeni inverzne Laplasove transformacije dobija se sljedeći izraz:

$$u_c(t) = \sqrt{U_{C0}^2 + \frac{L_t}{C_t} I_0^2} \cos(\omega_0 t - \phi) e^{-\sigma t} \quad (3)$$

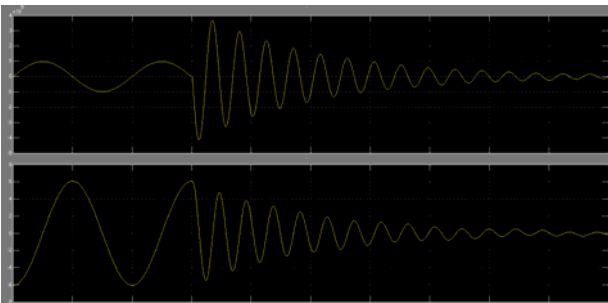
gdje su:

$$\sigma = \frac{R}{2L} \text{ - faktor prigušenja usljed omskog otpora } R,$$

$$U_{C\max} = \sqrt{U_{C0}^2 + \frac{L_t}{C_t} I_0^2} \text{ - maksimalni napon i}$$

$$\phi = \arctan \left( \sqrt{\frac{L_t}{C_t}} \frac{I_0}{U_{C0}} \right) [3].$$

Na sl. 3 dat je grafički prikaz napona na kondenzatoru  $C_t$  i struja kroz induktivitet  $L_t$ .



Slika 3. Grafički prikaz napona na  $C_t$  i struje kroz  $L_t$

Najkritičniji je ugao komutacije  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , onda je:

$$U_{C0} = 0 ; \quad I_0 = I_{mph} \quad (5)$$

Na osnovu prethodnih vrijednosti dobija se maksimalna vrijednost napona na kondenzatoru:

$$U_{C\max} = \sqrt{\frac{L_t}{C_t}} I_{mph} = \sqrt{\frac{51,86}{10^{-8}}} \cdot 6,07 = 437 \text{ kV} \quad (6)$$

Napon između kontakata prekidača iznosi:

$$u_{12}(t) = U_{c\max} \cos(\omega_0 t - \phi) e^{-\sigma t} - U_m \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (7)$$

U ovoj relaciji su zanemareni prelazni procesi u mreži (koji su definisani parametrima  $L_g$  i  $C_S$ ). Maksimalna vrijednost napona na kondenzatoru  $C_t$  dobijena pomoću simulacije iznosi 360 kV, a faktor prenapona je 3,64. Vakumski prekidači imaju struju sečenja do 10 A. U ovom slučaju uzet je najnepovoljniji trenutak sečenja struje, a to je kada ona dostiže maksimalnu vrijednost.

Prilikom isključenja relativno malih naizmjeničnih struja prekidačem, kontaktom ili sklopkom, javljaju se procesi koji dovode do intenzivne dejonizacije prostora između kontakata sklopnog aparata koji mogu izazvati gašenje električnog luka prije prirodnog prolaska struje kroz nulu. Prethodno opisana pojava zove se sječenje struje. Ona može prouzrokovati relativno visoke prenapone usljed nagomilane elektromagnetske energije na induktivnim elementima u kolu. Važno je naglasiti da prilikom prekidanja velikih struja koje su reda veličine naznačenih struja isključenja sklopnog aparata, električni luk ne može bitno da utiče na oblik struje koja se prekida. U tom slučaju, do gašenja dolazi u prirodnoj nuli struje. [1]

Na sl. 3 su prikazani napon i struja potrošača u prelaznom periodu nakon sečenja struje. Sa slike se zaključuje da prelazni proces počinje pri prolasku napona kroz nulu i pri maksimalnoj vrijednosti struje potrošača. Dakle, uspostavlja se prigušeni oscilatorni proces čija je frekvencija određena vrijednostima  $C_t$  i  $L_t$ , a prigušenje zavisi od male otpornosti koja potiče od gubitaka usljed vrtložnih struja u magnetskom jezgru.

Prilikom prekidanja malih induktivnih struja, nastanak prenapona je veoma komplikovan proces. Svi tipovi prekidača kod manjih vrijednosti struja forsiraju prijevremeni prolazak struje kroz nulu, pri čemu se oslobađa energija u induktivnom opterećenju stvarajući prenapone. Važnu ulogu u stvaranju prenapona imaju ograničena dielektrična čvrstoća međukontaktne razmaka prekidača, kao i sposobnost prekidača da prikaže visokofrekventne struje (slučaj višestrukih ponovnih proboja).

Kod aparata sa zavisnom karakteristikom gašenja luka, koji imaju medijum za gašenje koji se razlaže pri dejstvu visoke temperature, razvija se smjesa gasova usljed termičkog dejstva električnog luka. Ako se prekida veća struja, termičko dejstvo luka je izraženije, što dovodi do jačeg strujanja stvorenih gasova preko električnog luka. U ovu grupu aparata spadaju uljni, malouljni i drugi tipovi sklopnih aparata, kod kojih se

medijum za gašenje luka razlaže pri termičkom dejstvu električnog luka.

Kod aparata sa nezavisnom karakteristikom gašenja luka, intezitet strujanja medijuma za gašenje luka ne zavisi od veličine struje koja se prekida. Kod ovih aparata poseban mehanizam izaziva strujanje medijuma za gašenje za vrijeme gorenja električnog luka. Energija potrebna za strujanje medijuma za gašenje luka se dovodi iz posebnih izvora, za razliku od prethodnog slučaja kada je to toplotna ili magnetna energija električnog luka. U ovaj tip aparata spadaju pneumatski, SF<sub>6</sub>, malouljni aparati sa pumpom za uštricanje ulja za vrijeme gašenja luka.

Problem isključivanja malih induktivnih struja je izražen kod aparata sa nezavisnom karakteristikom gašenja luka jer se kod njih luk usljed male struje gasi istim intezitetom kao i kod struje kratkog spoja.[2]

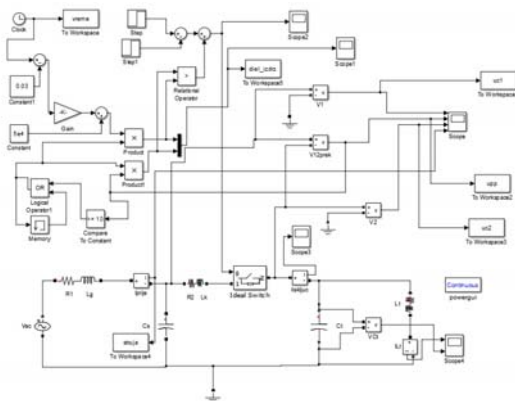
Proboj međukontaktnog prostora u prekidaču se takođe može modelovati u Simulinku na osnovu uslova da prelazni povratni napon između kontakata prekidača, nakon isključenja dostigne dielektričnu izdržljivost [4]-[6]. Promjena dielektrične izdržljivosti medijuma između kontakata se može modelovati na sljedeći način:

$$U_d(t) = U_{d0} + s_d \cdot t \quad (8)$$

gdje je:

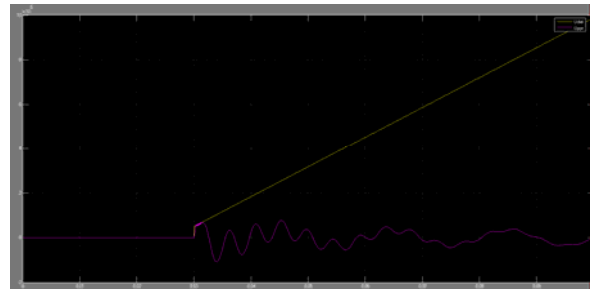
$U_{d0}$ - početna vrijednost napona dielektrične izdržljivosti i  
 $s_d$ - strmina napona dielektrične izdržljivosti.

U simulaciji je korišćeno logičko kolo koje prepoznaje da povratni napon dostiže dielektričnu izdržljivost tako da se u tom trenutku prosljeđuje signal prekidaču za uključivanje. Na ovaj način je modelovano ponovno paljenje luka da bi se u Simulinku modelovao proboj medijuma između kontakata. Na sl.4 prikazano je kolo za isključivanje malih induktivnih struja uz dodatak kola koje služi za modelovanje dielektrične izdržljivosti između kontakata prekidača i uključivanja prekidača kada prelazni povratni napon dostigne dielektričnu izdržljivost prekidača.



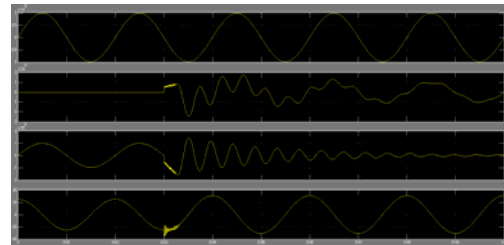
Slika 4. Model u Simulinku za isključivanje malih induktivnih struja sa kolom za modelovanje dielektrične izdržljivosti

U simulinku je vještački podešen prolazak struje kroz nulu u 0.03s i na sl. 5 prikazan je slučaj kada prelazni povratni napon dostigne napon dielektrične izdržljivosti prekidača.



Slika 5. Slučaj kada prelazni povratni napon dostiže dielektričnu izdržljivost međukontaktnog prostora prekidača

Na sl. 6 su redom dati grafički prikazi napona  $U_1$  sa strane mreže, napona  $U_{12}$  između kontakata prekidača, napona  $U_2$  sa strane potrošača i struje prije prolaska kroz prekidača. Nakon proboja napona između kontakata prekidača  $U_{12}$  kroz oscilatorni proces teži nuli, a nakon proboja napona  $U_2$  kroz oscilatorni proces teži naponu  $U_1$ .

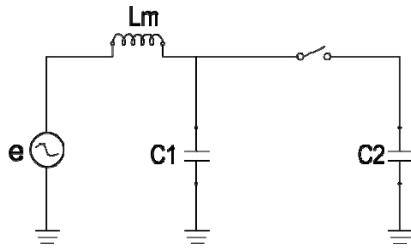


Slika 6. Napon  $U_1$  sa strane mreže, napon  $U_{12}$  između kontakata prekidača, napona  $U_2$  sa strane potrošača i struja prije prolaska kroz prekidač

S obzirom na to da prelazni povratni napon dostiže dielektričnu izdržljivost između kontakata prekidača, dolazi do ponovnog paljenja električnog luka. To se najbolje vidi na naponu između kontakata prekidača  $U_{12}$ , pri prolasku napona kroz nulu u trenutku 0.03 se pojavljuju visokofrekventne prigušene oscilacije.

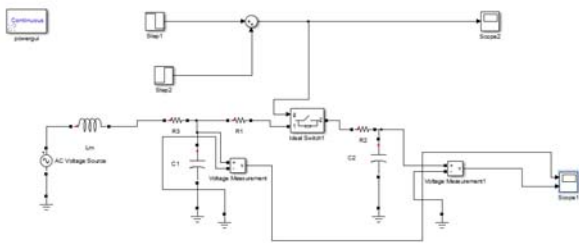
### III. ISKLJUČIVANJE MALIH KAPACITIVNIH STRUJA

Male kapacitivne struje se javljaju u slučaju sklapanja neopterećenih dalekovoda (dalekovodi u praznom hodu) ili kablova, te prilikom sklapanju kondenzatorskih baterija. Pojave koje se dešavaju pri isklapanju neopterećenih dalekovoda ili kablova se svode na analizu pojava pri prekidanju malih kapacitivnih struja kondenzatorskih baterija. Na sl. 7 prikazana je monofazna zamjenska šema pri isključivanju malih kapacitivnih struja.



Slika 7. Monofazna zamjenska šema pri prekidanju malih kapacitivnih struja [3]

Na sabirnicama 35 kV mreže priključene su dvije kondenzatorske baterije kapaciteta  $C_1=1,91\mu\text{F}$  i  $C_2=0,764\mu\text{F}$ . Jedna kondenzatorska baterija se isključuje dok druga ostaje priključena. Cilj ove analize je ispitati prenapone koji se mogu javiti prilikom ove komutacije ako dodje do ponovnog paljenja luka između kontakata prekidača. Na sl. 8 dat je Simulink model za isključivanje kapacitivnih struja.



Slika 8. Simulink model isključivanja malih kapacitivnih struja

Usvojena je vrijednost za induktivnost mreže  $L_m = 6.5 \cdot 10^{-3} \text{H}$ , a otpori  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$  imaju proizvoljno male vrijednosti od nekoliko oma. Kad su obje baterije uključene onda važi sljedeća jednakost:

$$E = U_s + jX_m I = \frac{1}{K_F} U_s \quad (9)$$

gdje je:

$K_F$ - koeficijent Ferantijevog efekta.

Maksimalna fazna vrijednost napona mreže je:

$$E_m = E_{\max, f} = U_{sm} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{U_s}{K_F} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot 35 = 28,6 \text{ kV} \quad (10)$$

Pri isključenju kondenzatora  $C_2$  na njemu ostaje zaostali napon, a napon na kontaktu 1 se mijenja po kosinusnom zakonu. Kada dođe do paljenja luka, dolazi do preraspodjele opterećenja između  $C_1$  i  $C_2$ , Proces preraspodjele opterećenja se odvija jako brzo, tako da se može smatrati trenutnim.

Ako je prekidač zatvoren (u stanju 1), kondenzatori su vezani paralelno tako da je ekvivalentna kapacitivnost:

$$C_1 + C_2 = C \quad (11)$$

Napon kontakata prekidača sa strane izvora se mijenja po kosinusnom zakonu  $U_s = U_{sm} \cos(\omega t + \varphi)$ , pa je u trenutku otvaranja kontakata i paljenja luka:

$$U_s = U_{sm} \cos \varphi \quad (12)$$

Napon između kontakata prekidača je:

$$U_{12} = U_{sm} \cos \varphi - U_{sm} \quad (13)$$

Najkritičniji slučaj je za  $\varphi = \pi$ , odnosno  $U_{12} = -2U_{sm}$ . Takođe, može se dokazati da je:

$$\frac{dU_{12}}{d\varphi} = 0 \Rightarrow \varphi = \pi \quad (14)$$

Diferencijalne jednačine koje važe u ovom kolu su:

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \quad (15)$$

$$e(t) = L \frac{di}{dt} + u_c(t) \quad (16)$$

Uz početne uslove  $i(0) = 0$ ,  $u_c(0) = U_C(0)$  nakon prebacivanja u Laplasov domen i vraćanje u vremenski domen dobija se:

$$u_c(t) = K_F E_m \cos(\omega t + \varphi) + A \quad (17)$$

$$A = (K_F E_m \frac{\omega}{\omega_1} \sin \varphi \sin \omega_1 t - K_F E_m \cos \varphi \cos \omega_1 t) e^{-\sigma t} + U_C(0) \cos \omega_1 t e^{-\sigma t}$$

Usvaja se  $e^{-\sigma t} = 1$  zbog male vrijednosti  $R$  i koeficijent Ferantijevog efekta iznosi približno 1. Početni napon na kondenzatoru je  $U_C(0) = \pm 12,3 \text{ kV}$ . Da li će vrijednost napona biti sa + ili - zavisi od toga da li se isključuje  $C_1$  ili  $C_2$ . Najkritičniji slučaj paljenja luka je  $\varphi = \pi$ , pa je napon na kondenzatoru  $C$ :

$$u_c(t) = K_F E_m \cos(\omega t + \pi) + K_F E_m \cos \omega_1 t + U_C(0) \cos \omega_1 t \quad (18)$$

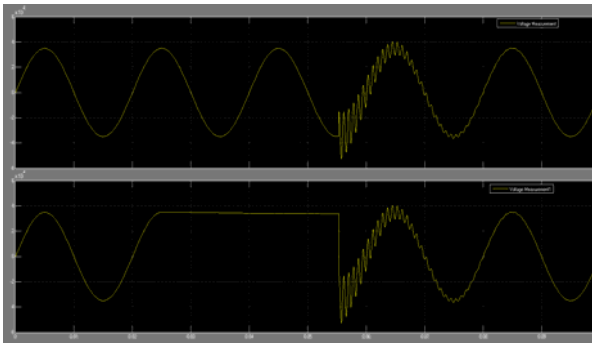
Maksimalni napon je:

$$U_{C\max} = K_F E_m (\cos(\frac{\omega}{\omega_1} + 1)\pi - 1) \mp U_C(0) = -56,96 \pm 12,25$$

$$U_{C\max 1} = 69,21 \text{ kV}$$

$$U_{C\max 2} = 44,71 \text{ kV} \quad [3] \quad (19)$$

Na sl. 9 dat je grafički prikaz napona na kondenzatorima  $C_1$  i  $C_2$ . Pri isključenju kondenzatorske baterije  $C_2$  u teorijskoj analizi je maksimalni dobijeni napon 44,71kV, a na osnovu simulacijske analize ta vrijednost iznosi 40kV, što je očekivana vrijednost.



Slika 9. Grafički prikaz napona na kondenzatorima  $C_1$  i  $C_2$  u trenutku  $t_2=0.055s$  ponovnog paljenja luka

Prekidanje struje se odvija u trenutku kada struja prolazi kroz nulu. Prolazak struje kroz nulu je u trenutku  $t_1=0,025s$ , kada je napon na kondenzatoru  $C_1$  maksimalan. Zbog reaktivnosti kola, u tom trenutku naponi na kondenzatorima su isti i imaju maksimalnu vrijednost  $U_1=U_2=U_{max}$ . Nakon toga napon  $U_1$  se mijenja po prostoperiodičnom zakonu, a  $U_2$  zadržava konstantnu vrijednost, kao što je prikazano na prethodnoj slici. Da bi se ispitao uticaj trenutka ponovnog paljenja luka na vrijednost maksimalnog napona analizirana su dva slučaja: ponovno paljenje luka u trenutku kada je povratni napon između kontakata prekidača maksimalan (0,05s) i ponovno paljenje luka pri manjem povratnom naponu između kontakata prekidača (u vremenu do četvrtine periode napona industrijske učestanosti). Pri ponovnom proboju se pojavljuju značajni prenaponi, a sam proces pražnjenja se svodi na dielektrični proboj izolacije između kontakata. Ako se ponovno paljenje luka dogodi neposredno poslije gašenja luka, kada prostor između kontakata nije još ohlađen, onda je to termički proboj međukontaktnog prostora. U slučaju isključenja malih kapacitivnih struja ponovni proboj je dielektrične ili termičke prirode. [2]

Sa grafika se vidi da nakon isteka poluperiode od trenutka prekida struje do ponovnog paljenja luka i uspostavljanja struje, napon  $U_2$  kroz prelazni proces teži naponu  $U_1$ . Dakle, u trenutku  $t_2=0,055s$  dolazi do ponovnog proboja. Ovo je najkritičniji trenutak, jer je razlika napona sa lijeve i desne strane najveća. Nakon toga, naponi  $U_1$  i  $U_2$  kroz oscilacije teže da uspostave prostoperiodični talasni oblik. U slučaju da u trenutku  $t_2=0,05s$  dolazi do ponovnog paljenja luka onda dobijamo manje kritičan slučaj. Svaki drugi trenutak ponovnog paljenja luka izaziva manji prenapon.

Sam proces isključenja kapacitivnih struja ne prouzrokuje prenapone. Napon koji nastaju između kontakata poslije isključenja (povratni napon), napreže dielektrik u međukontaktnom razmaku i može da izazove ponovni proboj između kontakata prekidača. Pri proboju i ponovnom paljenju luka mogu nastati opasni prenaponi.[2] Naime, ako je brzina uspostavljanja dielektrične čvrstoće međukontaktnog razmaka prekidača nakon prekidanja manja od brzine uspostavljanja povratnog napona, tada može da dođe do ponovnog proboja. Ako se vrijeme nastajanja ponovnog proboja desi u maksimalnom naponu, onda će napon kondenzatorske baterije zaoscilovati oko napona izvora i u kolu će se uspostaviti visokofrekventna struja. Važno je naglasiti da karakteristike

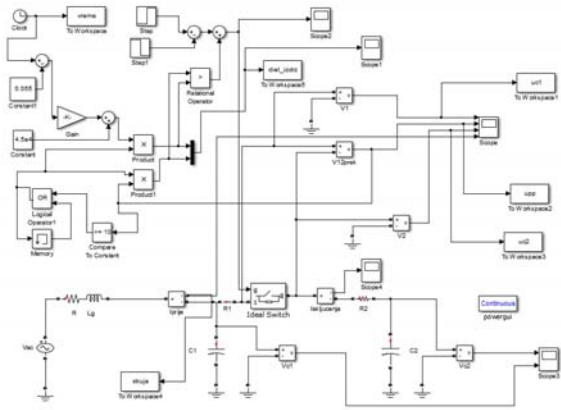
prekidača, odnosno njegova brzina razmicanja kontakata, vrsta medijuma za gašenje luka, kao i način oduvavanja luka imaju veliki uticaj na kvalitet prekidanja kapacitivne struje. Sa povećanjem brzine razmicanja kontakata smanjuje se vjerovatnoća ponovnog proboja. Od razmaka kontakata u trenutku gašenja luka zavisi uspješnost i kvalitet prekidanja.

U suštini sve vrste visokonaponskih prekidača u principu sa lakoćom gase luk kapacitivnih struja, ali se razlikuju u pogledu brzine uspostavljanja dielektrične čvrstoće međukontaktnog razmaka. Prekidanje kapacitivnih struja mnogo je lakše za pneumatske ili za  $SF_6$  prekidače, nego za malouljne prekidače. Kako se nazivni napon prekidača povećava, tako je teže prekidanje kapacitivnih struja. Ovaj problem je složeniji na većim nazivnim naponima prekidača, zato što se mora obezbijediti sve brže i brže uspostavljanje dielektrične čvrstoće međukontaktnog razmaka. [1]

Proboj međukontaktnog prostora u prekidaču pri isključenju kapacitivnih struja se takođe može modelovati u Simulinku na osnovu uslova da prelazni povratni napon između kontakata prekidača nakon isključenja dostigne dielektričnu izdržljivost, promjena dielektrične izdržljivosti je modelovana sljedećom formulom:

$$U_d(t) = U_{d0} + s_d \cdot t \quad (20)$$

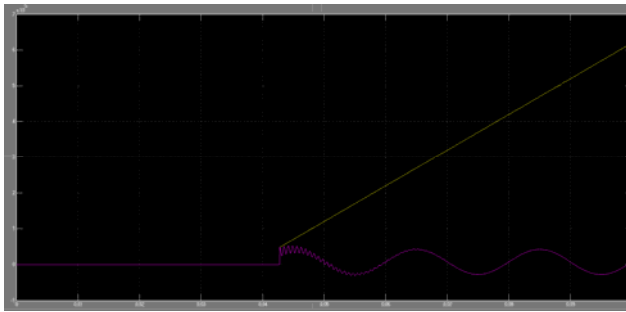
U simulaciji je korišćeno logičko kolo koje prepoznaje da povratni napon dostiže dielektričnu izdržljivost tako da se u tom trenutku prosljeđuje signal prekidaču za uključivanje. Na ovaj način je modelovano ponovno paljenje luka. Na sl. 10 prikazano je kolo za isključivanje kapacitivnih struja uz dodatak kola koje služi za modelovanje dielektrične izdržljivosti između kontakata prekidača i uključivanja prekidača kada prelazni povratni napon dostigne dielektričnu izdržljivost prekidača.



Slika 10. Model u Simulinku za isključivanje kapacitivnih struja sa kolom za modelovanje dielektrične izdržljivosti

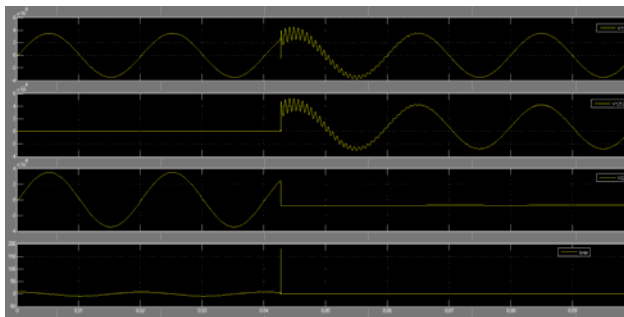
Vještački je podešen prolazak struje kroz nulu u 0.0425 s. Za razliku od prethodnog slučaja gdje je došlo do dvostrukog paljenja luka, u ovom slučaju je dobijeno jedno paljenje luka.

Na sl. 11 prikazan je slučaj kada prelazni povratni napon dostiže napon dielektrične izdržljivosti prekidača.



Slika 11. Prelazni povratni napon dostiže vrijednost dielektrične izdržljivosti prekidača

Na sl. 13 dat je grafički prikaz napona  $U_1$ , napona na prekidaču  $U_{12}$ , napona  $U_2$  i struje prije prolaska kroz prekidač, respektivno.



Slika 12. Napon  $U_1$  na kondenzatoru  $C_1$ , napon  $U_{12}$  između kontakata prekidača, napona  $U_2$  na kondenzatoru  $C_2$  i struja kroz prekidača

Dakle, kao što je prikazano na prethodnoj slici, pri paljenju luka u 0.0425 s pojavljuju se prigušeni oscilatorni naponu  $U_{12}$ .

#### IV. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je analiza prekidanja malih induktivnih struja pri isključenju transformatora koji je radio u režimu praznog hoda. Nakon otvaranja prekidača dešavaju se oscilacije u LC kolu usljed akumulirane energije u induktivnosti transformatora. Ove oscilacije su prigušenog karaktera zbog omske otpornosti koja potiče od gubitaka usljed vrtložnih struja u jezgru. U radu je izvršeno modelovanje prekidanja malih induktivnih struja u Simulink programskom modulu, kao i formiranje dodatnog kola za modelovanje dielektrične izdržljivosti međukontaktne prostora prekidača. Za trenutak komutacije je uzet trenutak kada struja ima maksimalnu vrijednost, a napon prolazi kroz nulu. Maksimalni prenapon iz simulacijske analize je za 17,62% manji od izračunate vrijednosti pri teorijskoj analizi.

U radu je takođe izvršeno modelovanje prekidanja kapacitivnih struja u cilju analize prenapona koji se javljaju pri ponovnom paljenju luka. Ako do ponovnog paljenja luka dođe u trenutku kada je povratni napon između kontakata prekidača maksimalan, u prelaznom procesu se postiže maksimalni prenapon. Pri isključenju kondenzatorske baterije  $C_2$  u simulacijskoj analizi je maksimalni dobijeni napon za 10,53% manji od izračunate vrijednosti pri teorijskoj analizi, što je očekivana vrijednost. Svaki drugi slučaj ponovnog paljenja luka u trenutku kada je povratni napon između kontakata manji izaziva manji prenapon.

Na osnovu izvršenih simulacija može se zaključiti da se sinhronim podešavanjem trenutaka otvaranja kontakata prekidača mogu značajno smanjiti prenaponi prilikom operacija isključenja malih induktivnih i kapacitivnih struja.

#### LITERATURA

- [1] Mirsad Kapetanović "Visokonaponski prekidači" Sarajevo, 2002
- [2] Milan Savić "Visokonaponski rasklopni aparati" Beograd, 2004
- [3] Jovan Mikulović, Mileta Žarković "Zbirka zadataka iz visokonaponskih rasklopnih aparata", Beograd, 2014
- [4] R. Garzon, Markkel Decker, High Voltage Circuit Breakers – Design and Applications, Inc., New York, 1997.
- [5] R. W. Alexander, D. Dufournet, "Transient recovery voltages (TRVs) for high-voltage circuit breakers", *IEEE Tutorial*, Calgary, Canada, October 16th 2008.
- [6] D. Braun, G. Koeppl, "Transient Recovery Voltages During the Switching Under Out-of-Phase Conditions", International Conference on Power Systems Transients – IPST, New Orleans, USA, 2003.

#### ABSTRACT

In this paper, an analysis was performed and simulations of the interruption of small inductive and capacitive current were shown. Interruption of small inductive currents is one of the most common switching operations that can cause significant overvoltages. Synchronous interruption of the current assumes the moment of interruption related to the current or voltage waveforms. The goal of synchronous switching operations is to reduce stress caused by voltage or current during the interruption of inductive or capacitive currents and switching on the long power lines.

#### SIMULATION OF SYNCHRONOUS INTERRUPTION OF SMALL INDUCTIVE AND CAPACITIVE CURRENTS

Lena Zec  
Jovan Mikulović