

Analiza prelaznih procesa u prekidačima pri isključenju struje bliskog kratkog spoja

Igor Petrović, Milica Dilparić

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
igorpetrovic.ari@gmail.com,

Jovan Mikulović

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
mikulovic@etf.rs

Sadržaj— U ovom radu prikazan je uticaj udaljenosti mesta kvara na naprezanje međukontaktnog prostora prekidača pri bliskom kratkom spoju. Analiza je izvršena u 35 kV mreži sa zanemarenim uticajem napona luka, gde su analizirani prvi maksimum i strmina prelaznog povratnog napona kada je vod modelovan koncentrisanim, a zatim i raspodeljenim parametrima. Izvršeno je poređenje napona koji su dobijeni simulacijom na modelu koji je formiran u programskom paketu Matlab, kao i analitičkim putem. Takođe, u radu je analizirano i uspostavljanje dielektrične izdržljivosti u odnosu na prelazni povratni napon između kontakata prekidača.

Ključne reči—prelazni povratni napon; dielektrična izdržljivost; strmina; prvi maksimum;

I. UVOD

Kratak spoj predstavlja poremećeno stanje mreže, odnosno poremećeno stanje EES-a. U mrežama se za vreme trajanja kratkog spoja javljaju enormno velike vrednosti struja. U opštem slučaju kratak spoj se dešava kada dođe do fizičkog kontakta ili do preskoka (kratak spoj preko luka) između delova kola koji su u normalnom radnom stanju na različitim potencijalima. Kod nadzemnih vodova do kratkih spojeva dolazi zbog raznih uzroka, kao što su delovanje groma, vetra, pad grana (drvo) na provodnike, zbog ptica ili drugih uticaja [1].

Posle gašenja luka između kontakata sklopnog aparata uspostavlja se napon usled dejstva mreže u kojoj je sklopni aparat priključen. Ovaj napon se naziva prelazni povratni napon i sastoji se iz dve komponente. Jednu komponentu čini napon na kontaktu aparata sa napojne strane, a drugu sa strane voda. Ukupan napon koji napreže međukontaktni prostor dobija se kao razlika ova dva napona. Istovremeno sa prelaznim povratnim naponom uspostavlja se i dielektrična izdržljivost prostora između kontakata sklopnog aparata [2].

Odmah nakon gašenja luka počinje uspostavljanje dielektrične izdržljivosti između kontakata. Brzina uspostavljanja dielektrične izdržljivosti zavisi od vrste medijuma za gašenje luka i od načina gašenja luka. Ali u opštem slučaju, uspostavljanje dielektrične izdržljivosti se odvija utoliko brže ukoliko se brže razmiču kontakti i intenzivnije uklanjaju ostaci električnog luka.

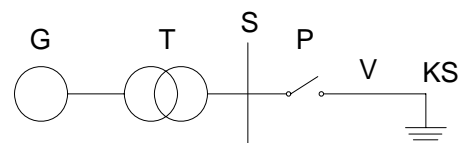
Prenaponi koji se javljaju u mreži usled isključenja kratkih spojeva nisu opasni za izolaciju elemenata mreže već za međukontaktni razmak sklopnog aparata. Ima se, dakle, prelazni povratni napon, izazvan odzivom mreže koji napreže međukontaktni prostor sa jedne i uspostavljanje dielektrične izdržljivosti tj. podnosivog napona sa druge strane. Zato su posebno važni strmina i oblik prelaznog povratnog napona.

Određivanje prelaznog povratnog napona izvršeno je na više načina za slučaj trolejnog kratkog spoja [3]-[7]. U ovom radu analiza prelaznog povratnog napona je izvršena na osnovu dva postupka. Po prvom postupku vod je modelovan koncentrisanim parametrima, a po drugom postupku vod je modelovan raspodeljenim parametrima.

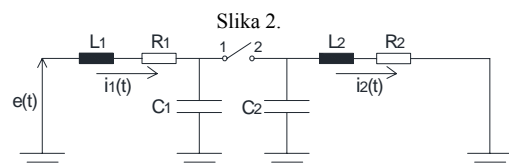
II. PRELAZNI POVATNI NAPON PRI BLISKOM KRATKOM SPOJU KADA JE VOD MODELOVAN KONCENTRISANIM PARAMETRIMA

Pod bliskim kratkim spojem ili kilometarskim kvarom podrazumeva se kratak spoj koji se dogodio na vodu nekoliko stotina metara ili nekoliko kilometara daleko od priključaka prekidača koji kvar isključuje.

Monofazna šema sistema u kome se isključuje blizak kratak spoj prikazana je na sl. 1, a ekvivalentna monofazna zamenska šema prikazana je na sl. 2 [3].



Slika 1. Monofazna šema sistema za analizu prelaznog povratnog napona pri bliskom kratkom spoju



Slika 2. Monofazna zamenska šema za određivanje prelaznog povratnog napona kod bliskog kratkog spoja

Oznake na sl. 2 su:

$e(t)$ - elektromotorna sila generatora ili ekvivalentna ems sistema,

L_1 - ukupna induktivnost generatora i transformatora,

R_1 - otpor koji modeluje sve gubitke u namotaju generatora i transformatora,

C_1 - kapacitivnost sabirnica,

L_2 - induktivnost dela voda do mesta kratkog spoja,

R_2 - otpor dela voda do mesta kratkog spoja,

C_2 - kapacitet dela voda do mesta kratkog spoja,

$i_1(t)$ - struja u kolu levo od prekidača,

$i_2(t)$ - struja u kolu desno od prekidača.

Pri prolasku struje kroz nulu dolazi do gašenja električnog luka i pojave prelaznog režima u delu kola i levo i desno od prekidača. Postavljanjem diferencijalnih jednačina za ove delove kola dobijaju se izrazi za napon na levom $u_{c1}(t)$, odnosno na desnom kontaktu prekidača $u_{c2}(t)$, a njihova razlika predstavlja prelazni povratni napon $u_{ppn}(t)$.

$$u_{c1}(t) = E_m \cos(\omega t) - E_m \frac{L_1}{L_1 + L_2} \cos(\alpha_1 \omega_1 t) e^{-\delta_1 t} \quad (1)$$

$$u_{c2}(t) = E_m \frac{L_2}{L_1 + L_2} \cos(\alpha_2 \omega_2 t) e^{-\delta_2 t} \quad (2)$$

$$u_{ppn}(t) = E_m \cos(\omega t) - \frac{E_m}{L_1 + L_2} (L_1 \cos(\alpha_1 \omega_1 t) e^{-\delta_1 t} + L_2 \cos(\alpha_2 \omega_2 t) e^{-\delta_2 t}) \quad (3)$$

gde su:

E_m – temena vrednost elektromotorne sile

ω - industrijska učestanost

$\delta_1 = R_1 / (2L_1)$ - koeficijent prigušenja napojnog dela kola

$\delta_2 = R_2 / (2L_2)$ - koeficijent prigušenja dela kola sa strane voda

$\omega_1 = 1 / \sqrt{L_1 C_1}$ - sopstvena učestanost napojnog dela kola

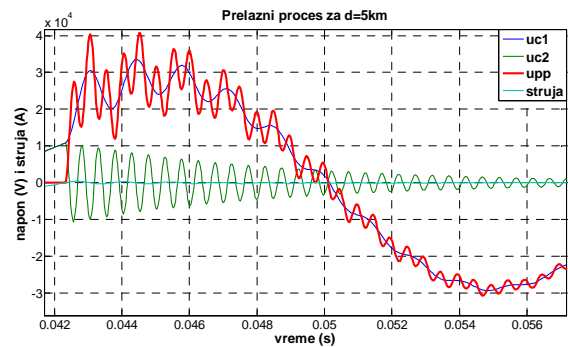
$\omega_2 = 1 / \sqrt{L_2 C_2}$ - sopstvena učestanost dela kola sa strane voda

$\alpha_1 = \sqrt{1 - \delta_1^2 / \omega_1^2}$ - koeficijent smanjenja sopstvene učestanosti napojnog dela kola usled uticaja prigušenja

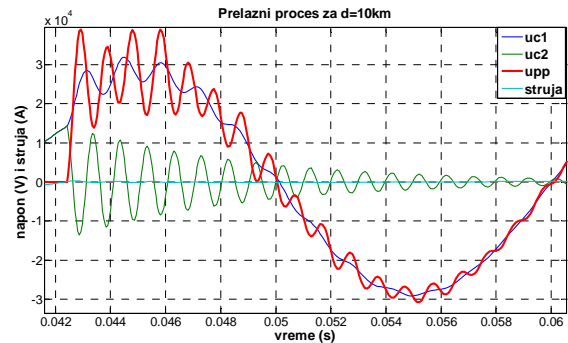
$\alpha_2 = \sqrt{1 - \delta_2^2 / \omega_2^2}$ - koeficijent smanjenja sopstvene učestanosti kola sa strane voda usled uticaja prigušenja.

Naponi koji se javljaju na kontaktima prekidača nakon njegovog otvaranja, mogu se simulirati u programu Matlab koristeći realne parametere u 35 kV mreži. U modelu koji se koristi u simulaciji, a formiran je na osnovu šeme sa sl. 2, koriste se sledeći parametri sa strane izvora: $R_1=2\Omega$, $L_1=4.856\text{mH}$, $C_1=10\mu\text{F}$, dok su podružni parametri voda koji se menjaju sa rastojanjem: $R_2=0.4\Omega/\text{km}$, $L_2=1.273\text{mH}/\text{km}$, $C_2=0.191\mu\text{F}/\text{km}$. U ovoj analizi simuliraju se prelazni procesi za kvarove na udaljenosti 5 km, 10 km i 20 km od prekidača. Ovako dobijeni prelazni procesi prikazani su na sl. 3, sl. 4 i sl. 5, gde je pored prelaznog povratnog napona između kontakata prekidača prikazana i struja kvara.

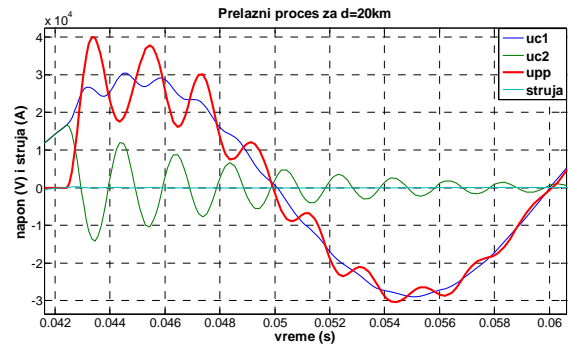
Ovim simulacijama prikazani su naponi na kondenzatorima C_1 i C_2 sa leve i desne strane prekidača, prelazni povratni napon, kao i struja kratkog spoja. Prelazni povratni napon na sl. 3, sl. 4 i sl. 5 počinje od nule, jer su naponi na kondenzatorima C_1 i C_2 u trenutku gašenja luka identični (zanemaren je uticaj pada napona na luku).



Slika 3. Prelazni proces za kvar na rastojanju $d=5$ km



Slika 4. Prelazni proces za kvar na rastojanju $d=10$ km



Slika 5. Prelazni proces za kvar na rastojanju $d=20$ km

Za slučaj većeg rastojanja do mesta kvara, visokofrekventni prelazni povratni napon nakon gašenja luka ima veću amplitudu, ali manju strminu nego u slučaju kraćeg voda. Iz ovih razloga, u slučaju udaljenijeg mesta kvara zbog manje strmine prelaznog povratnog napona postoji manja verovatnoća da dođe do ponovnog paljenja električnog luka, nego u slučaju kraćeg voda.

Prelazni povratni napon koji je dobijen analitičkim proračunom za rastojanje do mesta kvara $d=5\text{km}$, korišćenjem izraza 1, prikazan je na sl. 6.

$$u_{c1}(t) = 28577 \cos(314t) - 7890 \cos(4533.3t) e^{-205.93t} \quad (4)$$

$$u_{c2}(t) = 20687 \cos(6410t) e^{-157.1t} \quad (5)$$

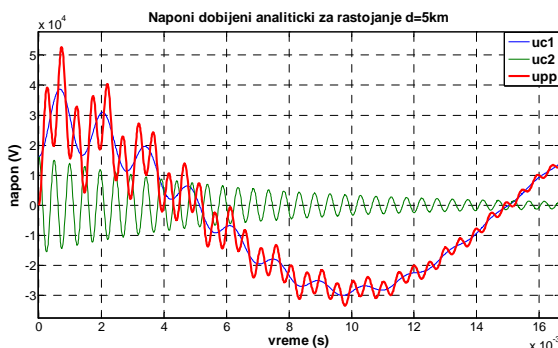
Upoređivanjem napona sa sl. 3 i sl. 6, za slučaj istog rastojanja do mesta kvara, može se videti da je u slučaju analitičkog proračuna značajno veća vrednost prelaznog povratnog napona, nego što je vrednost dobijena simulacijom. Ovo je posledica toga de je u analitičkom izrazu zanemarena aktivna otpornost, koja je uvažena u simulaciji. Da bi se korigovao ovaj rezultat vrši se korekcija u pogledu početnih vrednosti napona i faza. Naponi UC01 i UC02 predstavljaju početne uslove na kondenzatorima C1 i C2. Proračun je izvršen za jedno rastojanje $d=5\text{km}$, i naponi dobijeni na ovaj način prikazani su na sl. 7.

$$U_{C01} = U_{C02} = E \left| \frac{R_2 + j\omega L_2}{R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2)} \right| \quad (6)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega(L_1 + L_2)}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

$$u_{c1}(t) = 28577 \cos(314t) - 10114 \cos(4533.3t) e^{-205.93t} \quad (8)$$

$$u_{c2}(t) = 11373 \cos(12825t) e^{-157.1t} \quad (9)$$



Slika 6. Prelazni proces za rastojanje $d=5\text{ km}$ dobijen na osnovu analitičkog izraza

Rezultati dobijeni korišćenjem prethodnih metoda predstavljani su u tabeli I, gde je prikazan prvi maksimum prelaznog povratnog napona U_{1max} i vreme do prvog maksimuma prelaznog povratnog napona t_{1max} .

Na osnovu izračunatih prelaznih povratnih napona i nacrtanih dijagrama, može se zaključiti da mesto kratkog spoja ima veoma veliki uticaj na naprezanje prekidača. Sa povećanjem rastojanja mesta kvara od prekidača raste amplituda prvog maksimuma prelaznog povratnog napona, a smanjuje se početna strmina prelaznog povratnog napona.

III. PRELAZNI POVRATNI NAPON PRI BLISKOM KRATKOM SPOJU KADA JE VOD MODELOVAN RASPODELJENIM PARAMETRIMA

Kada se vod na kome se dogodio kvar predstavlja šemom sa raspedljenim parametrima na kome se odvija prostiranje talasa, na početku voda se pojavljuje specifičan vremenski oblik napona pri prelaznom procesu. Zamenska šema napojnog dela sistema identična je kao na sl. 2 [3].

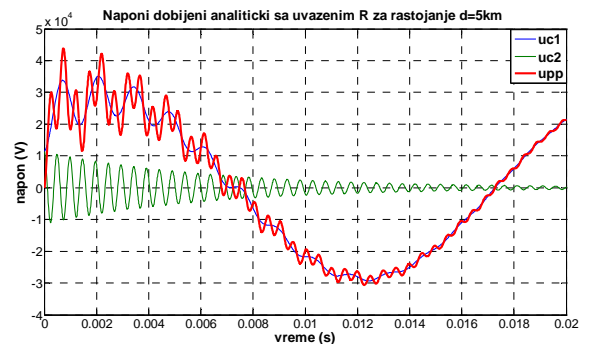
Zamenska šema i profil napona, odnosno prostorna raspodela trenutne vrednosti napona od izvora do mesta kratkog spoja u trenutku prolaska struje kroz nulu, sa zanemarenim uticajem omskih otpora prikazana je na sl. 8 [2].

Na osnovu sl. 8, odnosno profila napona, vidi se da je trenutna vrednost elektromotorne sile u trenutku gašenja luka jednaka temenoj vrednosti E_m . U tom trenutku pad napona na induktivnosti napojne strane voda je:

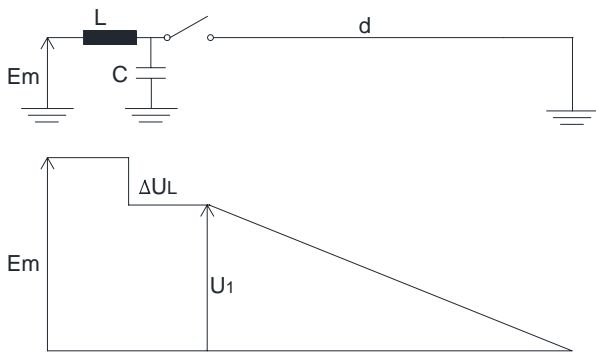
$$\Delta U_L = \omega L I_m \quad (10)$$

TABELA I. REZULTATI UPOREDNE ANALIZE ZA KVAROVE NA RAZLIČITIM UDALJENOSTIMA OD PREKIDAČA

Metoda	Simulacija			Analitički sa zanemarenim aktivnim otporom			Analitički sa uvaženim aktivnim otporom		
	5	10	20	5	10	20	5	10	20
Rastojanje (km)	5	10	20	5	10	20	5	10	20
U_{1max} (kV)	27.4	38.9	40.1	39.3	51.9	49.8	30.1	41.2	41.5
t_{1max} (ms)	0.3	0.5	0.9	0.26	0.5	0.89	0.27	0.53	0.9



Slika 7. Prelazni proces za rastojanje $d=5\text{ km}$ dobijen na osnovu analitičkog izraza uvažavajući aktivne otpornosti



Slika 8. Prostorna raspodela napona u sistemu kada je vod modelovan raspodeljenim parametrima

Oznake na sl. 8 imaju sledeće značenje:

- d – prostorna udaljenost mesta kratkog spoja od prekidača,
- $T=d/v$ – vreme prostiranja talasa od početka voda do mesta kratkog spoja,
- v - brzina prostiranja talasa.

Može se smatrati da napon od prekidača do mesta kratkog spoja linearno opada od napona na početku voda U_1 do nule na mestu kratkog spoja.

$$U_1 = I_m x_v d \quad (11)$$

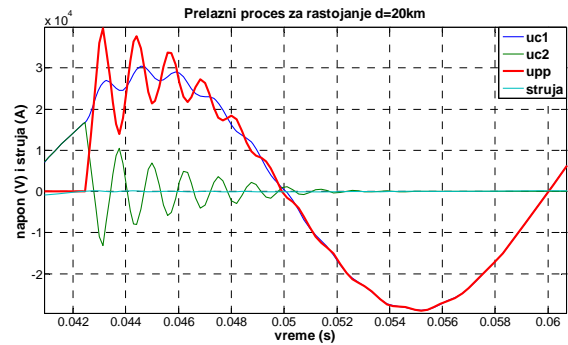
gde je:

- U_1 - napon na početku voda,
- I_m - temena vrednost struje kratkog spoja,
- x_v - podužna reaktansa voda.

Napon koji vlada na vodu u trenutku gašenja luka može da se razloži na putujuće talase. Komponenta napona koja se kreće brzinom v od mesta kratkog spoja ka početku voda naziva se inverznim talasom i obeležava se sa U_i . Komponenta napona koja se kreće od početka ka kraju voda obeležava se sa U_d i naziva se direktnim talasom.

Naponi koji se javljaju na kontaktima prekidača u ovom slučaju, takođe se mogu simulirati u Matlabu, gde postoji poseban model voda sa raspodeljenim parametrima. Simulacija je izvršena za rastojanje do mesta kvara od 20 km koristeći realne parametre u 35 kV mreži. Dobijeni prelazni proces prikazan je na sl. 9.

Jedina razlika u rezultatima kod modelovanja voda raspodeljenim parametrima u odnosu na modelovanje koncentrisanim parametrima je što od samog početka pojave prelaznog povratnog napona postoji linearni porast napona između kontakata, koji daje značajnu početnu strminu prelaznog povratnog napona neposredno nakon gašenja luka.



Slika 9. Prelazni proces za rastojanje $d=20$ km gde je vod modelovan raspodeljenim parametrima

IV. PROCENJIVANJE GRANIČNE UDALJENOSTI MESTA KVARA

Na osnovu analize prelaznih povratnih napona pri isključenju bliskog kratkog spoja, može se uočiti da sa porastom rastojanja mesta kvara raste prvi maksimum prelaznog povratnog napona, ali se smanjuje strmina linearnog porasta napona do prvog maksimuma. Ukoliko je za vreme linearnog porasta prelaznog povratnog napona do prvog maksimuma dielektrična izdržljivost između kontakata uvek veća od prelaznog povratnog napona, postoji velika verovatnoća da će se zadržati ista tendencija i kasnije, pa neće doći do ponovnog paljenja luka.

U cilju određivanja rastojanja koja su kritična za isključenje bliskog kratkog spoja, izvršena je kvalitativna analiza porasta dielektrične izdržljivosti i prelaznog povratnog napona.

Dielektrična izdržljivost $ud(t)$ između kontakata u trenutku gašenja električnog luka već ima neku vrednost Ud_0 i njena zavisnost u odnosu na strminu dielektrične izdržljivosti S_d data je sledećom formulom:

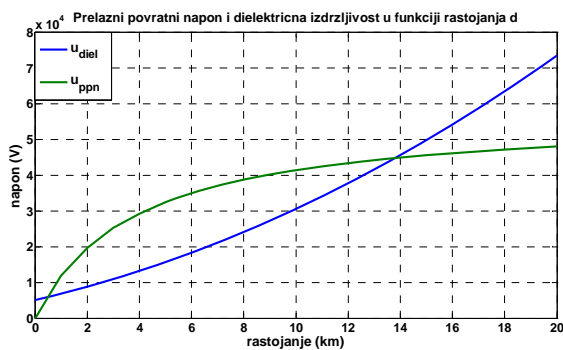
$$u_d(t) = U_{d0} + S_d t \quad (12)$$

Funkcionalna zavisnost dielektrične izdržljivosti u zavisnosti od rastojanja d do mesta kvara može se posle sređivanja napisati u obliku sledeće kvadratne funkcije.

$$U_d = \frac{\omega K_1 L_1}{E} + \left(\frac{2\omega K_2 L_1}{vE} + \frac{\omega K_1 l_v}{E} \right) d + \frac{2\omega K_2 l_v}{vE} d^2 \quad (13)$$

Koeficijenti K_1 i K_2 su konstante koje zavise od konstrukcije prekidača i uslova gašenja luka.

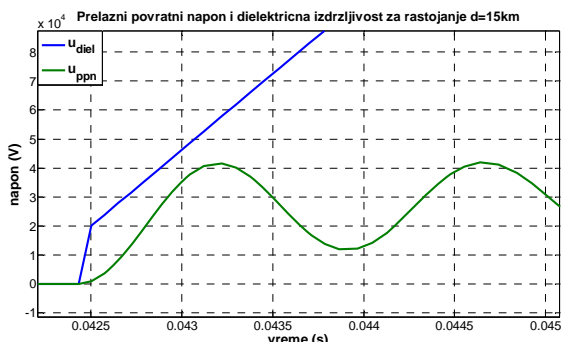
Analiza je izvršena na dva načina. Prvo je analitičkim putem određena zavisnost prvog maksimuma prelaznog povratnog napona i odgovarajuće dielektrične izdržljivosti u funkciji rastojanja, što je prikazano na sl. 10. Zatim je određena zavisnost prelaznog povratnog napona i dielektrične izdržljivosti u funkciji vremena za rastojanja mesta kvara $d=5$ km i $d=15$ km, simuliranjem na odgovarajućem modelu u programu Matlab, što je prikazano na sl. 11 i sl. 12.



Slika 10. Prelazni povratni napon i dielektrična izdržljivost u funkciji rastojanja d dobijeni analitički



Slika 11. Prelazni povratni napon i dielektrična izdržljivost za rastojanje $d=5\text{km}$ dobijeni simulacijom



Slika 12. Prelazni povratni napon i dielektrična izdržljivost za rastojanje $d=15\text{ km}$ dobijeni simulacijom

Na osnovu sl. 10 može se zaključiti da analizirani prekidač, kome odgovaraju koeficijenti K_1 i K_2 , nije u mogućnosti da prekine struju kvara za rastojanja koja su kraća od 14 km, odnosno prelazni povratni napon je u svakom trenutku veći od dielektrične izdržljivosti, tako da dolazi do ponovnog proboja i obrazovanja električnog luka između kontakata prekidača. Za kvarove koji se dogode na većem rastojanju od 14 km, prekidač uspešno prekida struju kvara, jer je prelazni povratni napon u svakom trenutku niži od dielektrične izdržljivosti, pa ne postoji opasnost od ponovnog proboja.

Ova analiza potvrđena je i simulacijom na odgovarajućem modelu u programu Matlab, gde se na osnovu sl. 11 jasno vidi da je za kvar na rastojanju $d=5\text{ km}$ prvi maksimum prelaznog povratnog napona viši od dielektrične izdržljivosti, pa kvar nije uspešno isključen. Takođe, sa sl. 12 se vidi da isti prekidač

uspešno isključuje kvar na rastojanju $d=15\text{ km}$, jer je prvi maksimum prelaznog povratnog napona niži od dielektrične izdržljivosti i takva tendencija se zadržava i dalje.

V. ZAKLJUČAK

Prekidanje velikih struja kratkih spojeva predstavlja jedan od najtežih zadataka koji se postavlja pred rasklopnu opremu, jer se javljaju velika termička naprezanja međukontaktne prostora. Takođe, posle gašenja luka dolazi do pojave napona između kontakata koji napreže dielektrik, a koji se još nije u potpunosti regenerisao. Ovaj napon u prelaznom režimu se naziva prelazni povratni napon.

Na osnovu simulacija može se zaključiti da za slučaj većeg rastojanja do mesta kvara, visokofrekventni prelazni povratni napon nakon gašenja luka ima veću amplitudu, ali manju strminu nego u slučaju kraćeg voda. Iz ovih razloga, u slučaju udaljenijeg mesta kvara zbog manje strmine, postoji manja verovatnoća da dođe do ponovnog paljenja električnog luka, nego u slučaju kraćeg voda.

Kod analitičkog predstavljanja prelaznih procesa, na osnovu induktivne raspodele napona dobijaju su veće vrednosti prelaznih povratnih napona, nego u slučaju kada se u simulaciji uzimaju u obzir i aktivne otpornosti. Korekcija ovih rezultata izvršena je u pogledu početne vrednosti napona i faze, odnosno koristeći analitičke izraze sa uvaženim aktivnim otporom.

Jedina razlika u rezultatima kod modelovanja voda raspodeljenim parametrima u odnosu na modelovanje koncentrisanim parametrima je što od samog početka pojave prelaznog povratnog napona postoji linearni porast napona između kontakata, koji daje značajnu početnu strminu prelaznog povratnog napona neposredno nakon gašenja luka.

Uvažavanjem porasta dielektrične izdržljivosti između kontakata prekidača, može se zaključiti da ukoliko je za vreme linearnog porasta prelaznog povratnog napona do prvog maksimuma, dielektrična izdržljivost uvek veća od prelaznog povratnog napona, postoji velika verovatnoća da će se zadržati ista tendencija i kasnije, pa neće doći do ponovnog proboja i paljenja luka. Zato je jako važno da se dielektrična izdržljivost uspostavlja brže od prelaznog povratnog napona.

LITERATURA

- [1] N.Rajaković: "Analiza elektroenergetskih sistema I", Elektrotehnički fakultet-Akadska misao, Beograd 2002.
- [2] M.S.Savić: Visokonaponski rasklopni aparati, Akadska misao, Beograd 2004.
- [3] http://bib.irb.hr/datoteka/323001.Prekidanje_struje.pdf
- [4] R. Garzon, High Voltage Circuit Breakers – Design and Applications, Markel Decker 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] B. Grčić, I. Uglešić, D. Grčić, "Analysis of Transient Recovery Voltage in 400 kV SF6 Circuit Breaker Due to Transmission Line Faults", *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 6, N. 5, September-October 2011.
- [7] D. Braun, G. Koepl, "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, the effect of fault distance on dielectric strength between the breaker's contacts during a close short circuit is presented. The analysis of the first maximum and steepness of the transient recovery voltage was performed in 35 kV network neglecting the influence of the arc voltage, when the line was modeled by concentrated and then by distributed parameters. A comparison of the voltages obtained by the simulation model created in MATLAB and voltages obtained analytically is performed. The paper also analyzes the establishment of the dielectric strength compared to the transient recovery voltage between the breaker's contacts.

Key words- transient recovery voltage; dielectric strength; steepness; first maximum;

Analysis of Transients in Circuit Breakers during Close Short Circuit Current Interruption

Igor Petrović
Milica Dilparić
Jovan Mikulović