

Prof.dr.sc. Ivo Uglešić, dipl.ing.  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
ivo.uglesic@fer.hr

Dr.sc. Božidar Filipović-Grčić, dipl.ing.  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr

Mr.sc. Srećko Bojić, dipl.ing.  
Institut za elektroprivredu i energetiku d.d., Zagreb  
srecko.bojic@ie-zagreb.hr

## ANALIZA KVARA 400 kV SF<sub>6</sub> PREKIDAČA USLIJED ISKLOPA DALEKOVODA U PRAZKOM HODU

### SAŽETAK

U radu je prikazana „post-mortem“ analiza kvara 400 kV SF<sub>6</sub> prekidača uslijed isklopa dugog i neopterećenog 400 kV dalekovoda. Pri analizi su korišteni podaci o snimljenim prijelaznim pojavama za vrijeme kvara iz sustava za praćenje kvalitete električne energije i sustava WAMS. Iskapanje prekidača simulirano je u programu EMTP-RV i rezultati proračuna su uspoređeni s mjerenjima. Analiziran je utjecaj kondenzatora ugrađenih paralelno prekidnim komorama na raspodjelu napona.

**Ključne riječi:** kvar 400 kV SF<sub>6</sub> prekidača, povratni preskok, prijelazni povratni napon, sklapanje

## ANALYSIS OF 400 kV SF<sub>6</sub> CIRCUIT BREAKER FAILURE DUE TO SWITCHING NO-LOAD TRANSMISSION LINE

### SUMMARY

The paper presents the case study of SF<sub>6</sub> circuit breaker failure during switching-off an unloaded and long 400 kV transmission line. Recorded transients from power quality monitoring system and WAMS were used for circuit breaker post-mortem analysis. Simulations and fault analysis were carried out using EMTP-RV software and calculation results were compared to measurements. Influence of grading capacitors on voltage distribution across the breaking chambers was analyzed.

**Key words:** 400 kV SF<sub>6</sub> circuit breaker failure, re-strike, transient recovery voltage, switching

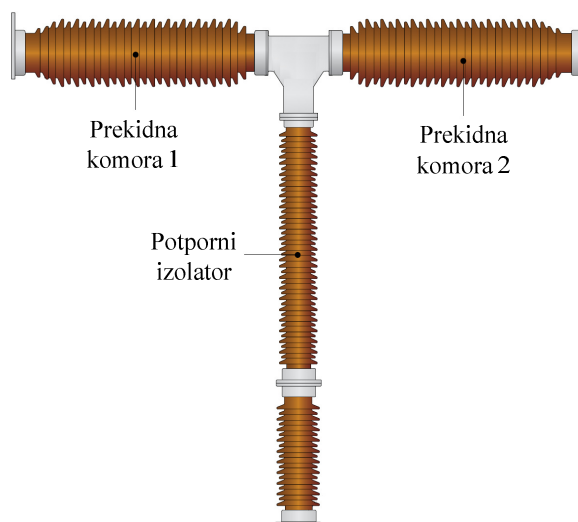
### 1. UVOD

Otežani uvjeti prekidanja električnog luka koji nastupaju u slučaju isklopa dugog dalekovoda u praznom hodu mogu biti presudni pri odabiru vrste prekidača, a posebno broja prekidnih komora. Polovinu periode nakon prekidanja kapacitivne napon na prekidaču jednak je dvostrukoj vršnoj vrijednosti napona mreže. Rizik od pojave povratnog preskoka je veći što je brzina otvaranja kontakata manja. U trenutku isklopa može se dogoditi da fazni napon pola prekidača koji se isklapa dosegne vrijednosti mnogo veće od ispitnih napona koji su normama propisani za prekidače u ovakvim uvjetima [1]-[2].

Ovaj porast napona može biti posljedica ispada tereta i Ferrantijevog efekta na dalekovodu [3]. Prilikom isklopa dalekovoda u praznom hodu prekidač prekida kapacitivnu struju i na njegovim kontaktima javlja se prijelazni povratni napon (PPN). Ako je amplituda ili strmina PPN-a prevelika može doći do pojave povratnog preskoka između kontakata te kvara prekidača [4]-[6].

## 2. KVAR 400 kV PREKIDAČA

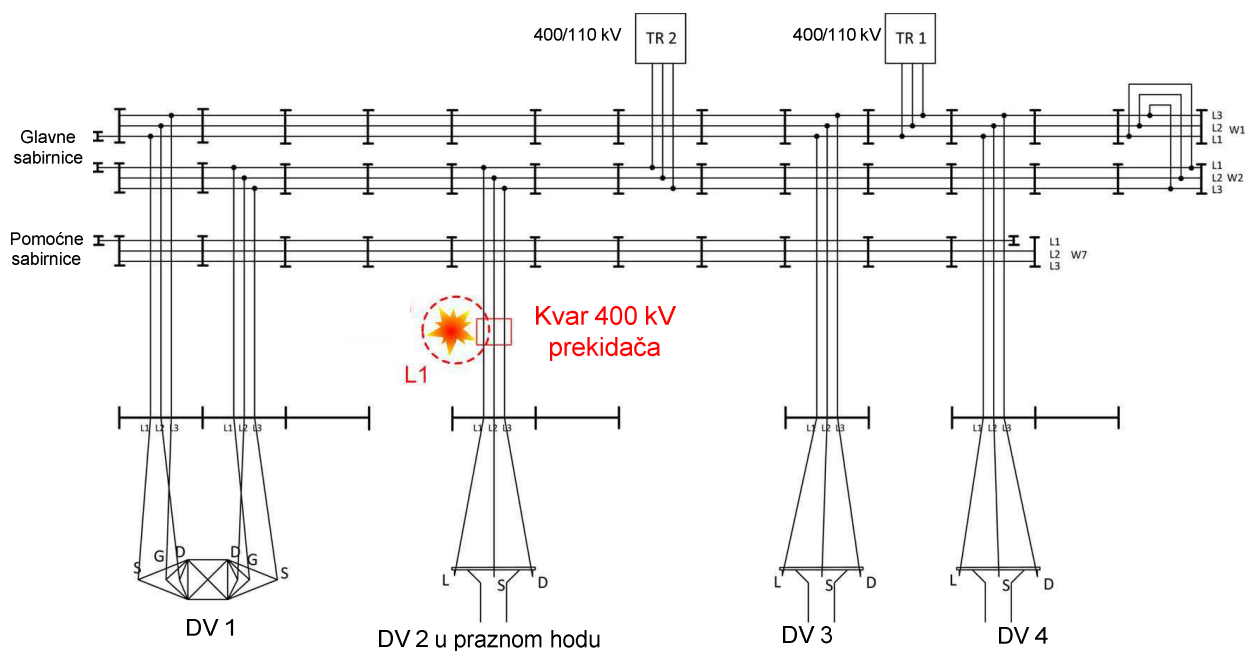
Analiziran je kvar 400 kV SF<sub>6</sub> prekidača s dvije prekidne komore bez paralelno ugrađenih kondenzatora za izjednačavanje raspodjele potencijala (slika 1).



Slika 1. 400 kV SF<sub>6</sub> prekidač s dvije prekidne komore

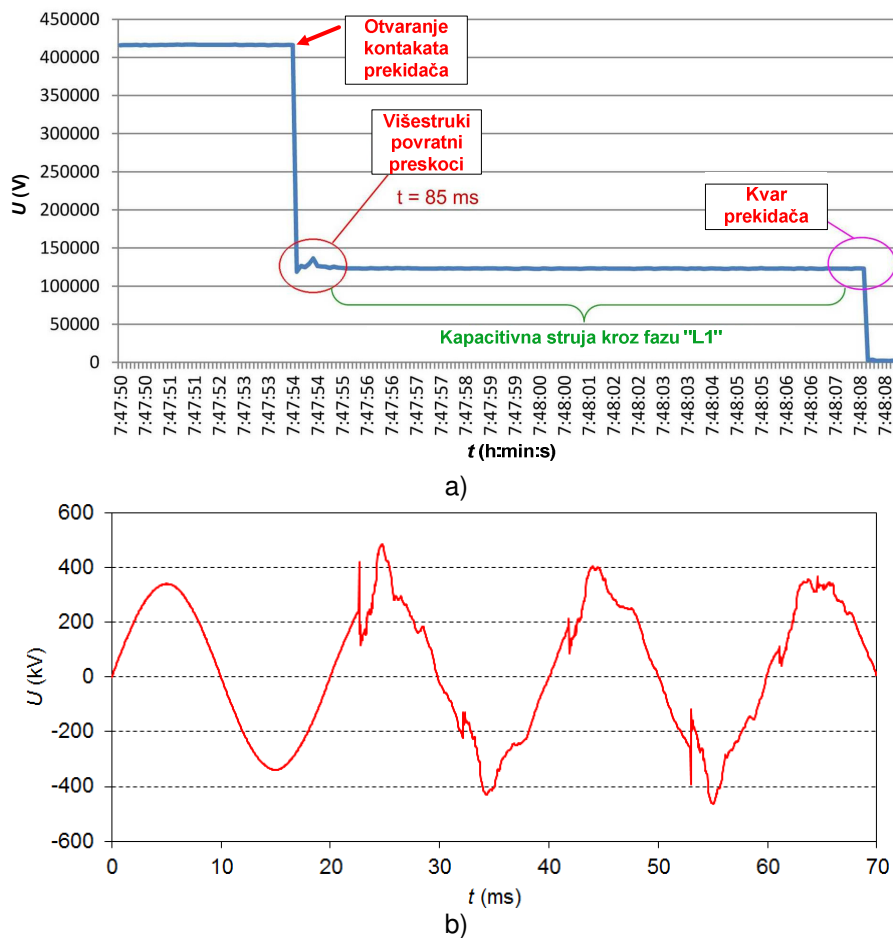
Kvar prekidača nastupio je uslijed isklapanja 231 km dugog dalekovoda u praznom hodu i pojave povratnih preskoka između kontakata prekidača, što je rezultiralo naglim povišenjem tlaka plina u komorama te konačno eksplozijom komora i rasprsnućem porculanskih izolatora.

Uklonno stanje dalekovoda i energetskih transformatora u 400 kV postrojenju za vrijeme kvara prekidača prikazano je na slici 2.



Slika 2. Uklonno stanje 400 kV rasklopnog postrojenja u trenutku kvara

Prijelazne pojave za vrijeme trajanja kvara snimljene su u vodnom polju 1 sustavom za praćenje kvalitete električne energije PQMS (*eng.* Power quality monitoring system) – slika 3 b) i WAMS (*eng.* Wide area monitoring system) sustavom – slika 3 a).



Slika 3. a) Mjerenja napona sustavom WAMS od trenutka otvaranja kontakata prekidača do kvara; b) Povratni preskoci zabilježeni sustavom za praćenje kvalitete električne energije

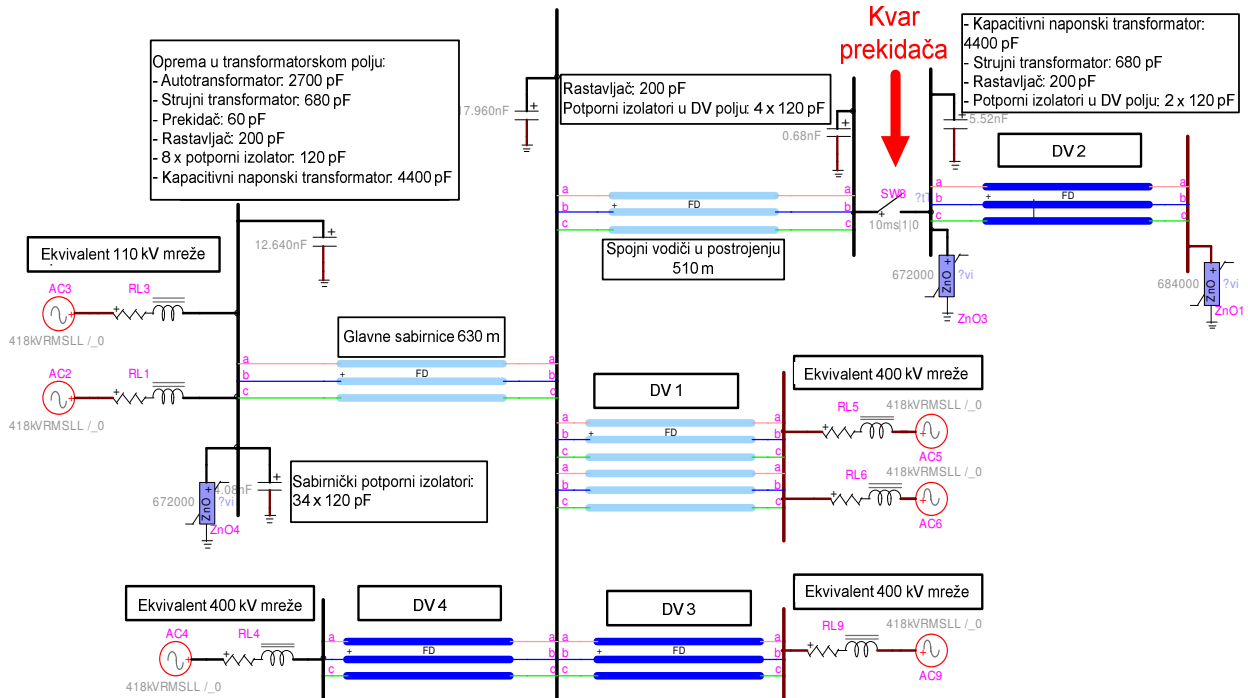
Sustav WAMS zasnovan je na je na ugrađenim uređajima za mjerenje fazora napona i struje u točkama EES-a od posebne važnosti, u realnom vremenu pomoću PMU uređaja (*eng.* Phasor Measurement Unit). WAMS platforma daje realnu dinamičku sliku EES-a, veću točnost mjerenja, brzu razmjenu podataka te algoritme koji omogućavaju koordinaciju i pravovremeno alarmiranje u slučaju pojave nestabilnosti u EES-u.

Slika 3 a) prikazuje naponsko stanje snimljeno WAMS sustavom od trenutka otvaranja kontakata prekidača do kvara. Prekidač je uspješno isključio u fazama L2 i L3, ali ne i u fazi L1. Prilikom isključenja prekidača, u fazi L1 višekратно dolazi do povratnog preskoka, trajanja oko 85 ms, a zatim do trajnog električnog luka. Polovi prekidača u preostale dvije faze uredno su isključili. U fazi L1 teče kapacitivna struja reda 150-200 A, a napon registriran u WAMS sustavu iznosi oko 125 kV. Budući da kod isklapanja nije došlo do gašenja električnog luka, u sljedećih 14 sekundi dolazi do postupnog zagrijavanja i naglog porasta tlaka SF<sub>6</sub> plina u komorama te rasprsnuća porculanskih izolatora obje komore.

Slika 3 b) prikazuje povratne preskoke snimljene uređajima za praćenje kvalitete električne energije koji se priključuju na sekundarne strane strujnih i naponskih transformatora te nisu predviđeni ni ispitani za prenošenje visokofrekvencijskih pojava, što treba imati na umu kod interpretacije mjernih oscilograma. Snimljeni valni oblici iskorišteni su u „post-mortem“ analizi kvara prekidača. Kako bi se detaljnije analizirale pojave koje su dovele do kvara prekidača izrađen je simulacijski model u programu EMTP-RV [7].

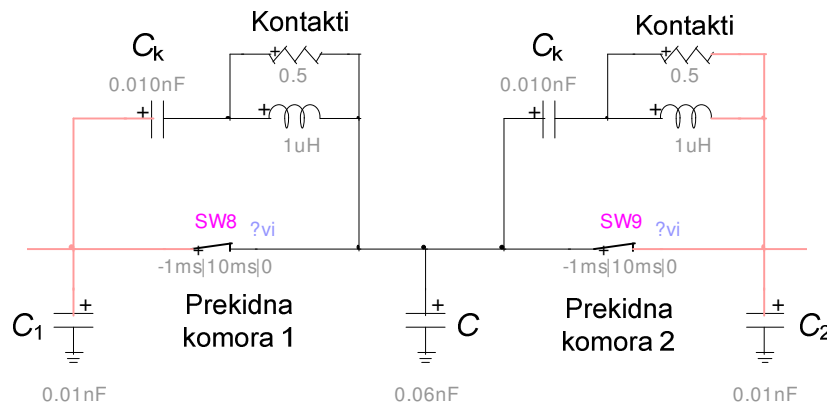
### 3. MODEL 400 kV POSTROJENJA I DALEKOVODA

U programu EMTP-RV izrađen je detaljan trofazni model 400 kV rasklopnog postrojenja i priključenih dalekovoda (slika 4). Model je korišten za simulacije isklopa DV u praznom hodu i analizu kvara prekidača u vodnom polju DV 2.



Slika 4. Model 400 kV postrojenja u programu EMTP-RV

Modelirano je uklopno stanje u trenutku neposredno prije nastanka kvara prekidača. Model za simulaciju uključuje sve komponente bitne za proračune, elemente postrojenja i dalekovoda. 400 kV dalekovodi, glavne sabirnice i spojni vodiči u transformatorskim i dalekovodnim poljima modelirani trofazno frekvencijski ovisnim J.Martini modelom, prema kojemu se karakteristična impedancija  $Z_c(\omega)$  i faktor rasprostiranja  $A_p(\omega)$  aproksimiraju racionalnim funkcijama višeg reda [8]. Kod modeliranja dalekovoda u obzir su uzeti i prepleti. Dalekovodi imaju dva Al/C-490/65 vodiča u snopu s razmakom 400 mm. Metal-oksidni odvodnici prenapona modelirani su nelinearnom  $U-I$  karakteristikom s obzirom na sklopne prenapone. Model prekidača pri prekidanju kapacitivne struje DV-a u praznom hodu prikazan je na slici 5.



Slika 5. Model 400 kV SF<sub>6</sub> prekidača s dvije prekidne komore

U modelu su u obzir uzeti kapaciteti prekidnih komora  $C_k=10$  pF, kapacitet prekidnih komora prema zemlji  $C=60$  pF i kapaciteti  $C_1=C_2=10$  pF (slika 5). Sabirnice u RP 400 kV su cijevne, izrađene od aluminijske legure E-AlMgSi. Vanjski promjer cijevi je 220 mm, a unutarnji 204 mm, što daje presjek  $5328$  mm<sup>2</sup>. Sabirnice se nalaze na potpornim izolatorima na visini 12,6 m iznad tla. Spojni vodiči su cijevi i Al/C vodiči (užeta). Vanjski promjer ovih cijevi je 110 mm, a unutarnji 88 mm, što daje za presjek iznos od  $3421$  mm<sup>2</sup>.

Ekvivalente mreže modelirane su naponskim izvorom te direktnom i nultom impedancijom određenom iz struja jednopolnog i trolnog kratkog spoja za uklopno stanje koje je vladalo u trenutku prije kvara prekidača (tablica I).

Tablica I. Struje trolnog i jednopolnog kratkog spoja u 400 kV postrojenju

Polje	$I_3$ (kA/°)	$I_1$ (kA/°)
Dalekovod 1 (86.3 km)	3.4/-85.5	2.4/-82.2
	3.4/-85.5	2.4/-82.2
Dalekovod 2 (231 km)	2.4/84.8	1.8/-80.0
Dalekovod 3 (91.5 km)	4.1/-84.9	3.3/-79.9
Dalekovod 4 (152 km)	3.9/84.9	3.0/-80.1
Energetski transformator TR 1 (400/110 kV)	1.2/-81.5	1.3/-84.8
Energetski transformator TR 2 (400/110 kV)	1.1/-81.5	1.3/-84.8
Ukupno:	19.5/-84.7	15.6/-81.6

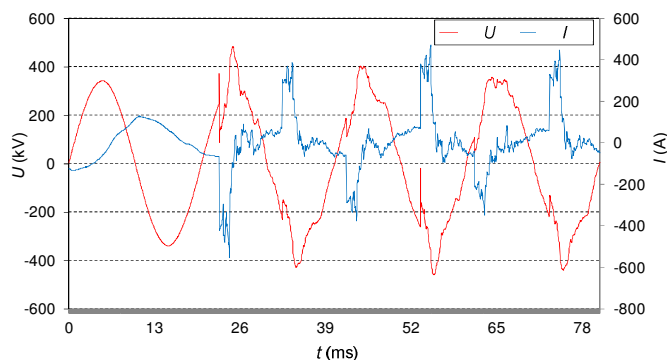
#### 4. REZULTATI PRORAČUNA

Analizirana su dva različita slučaja:

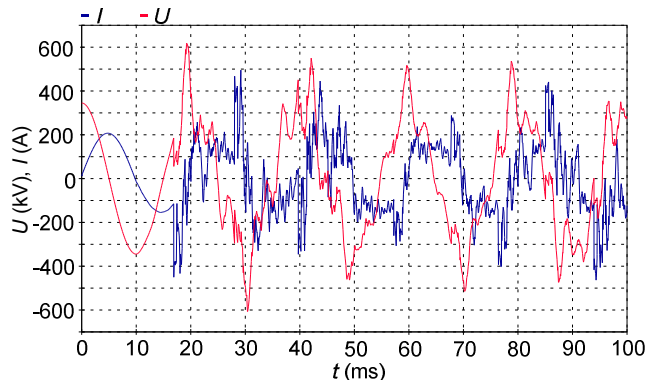
- A) „Post-mortem“ analiza kvara prekidača temeljena na prijelaznim pojavama koje su zabilježili sustavi za praćenje kvalitete električne energije (PQMS) i sustav WAMS.
- B) Uspješni (regularni) isklon prekidača.

##### A) Kvar prekidača

Kako bi se razjasnile okolnosti koje su dovele do kvara prekidača analizirane su snimljene prijelazne pojave (slika 6). Valni oblici napona i struje ukazuju na pojavu višestrukih povratnih preskoka za vrijeme isklopa prekidača. Slika 7 prikazuje rezultate proračuna struje i napona za vrijeme kvara prekidača.

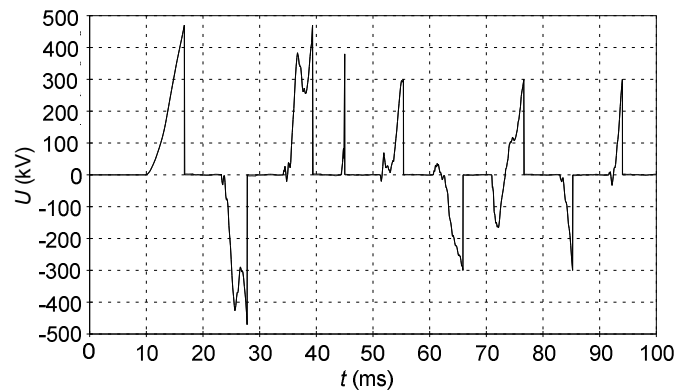


Slika 6. Napon i struja izmjereni sustavom za praćenje kvalitete električne energije PQMS

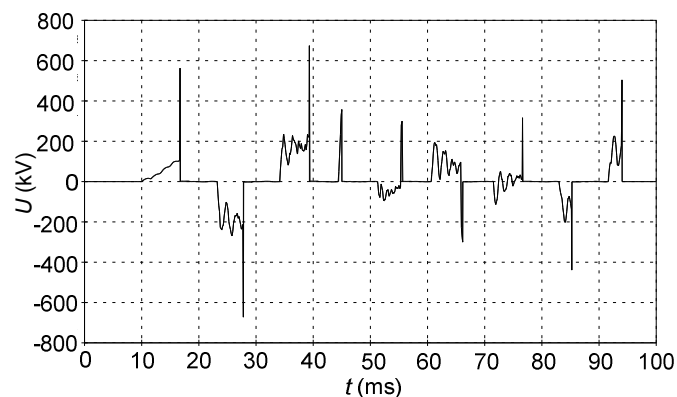


Slika 7. Izračunati napon i struja za vrijeme kvara prekidača

Do prvog povratnog preskoka dolazi u komori sa strane rasklopnog postrojenja (slika 8) zbog toga što je amplituda PPN-a veća u toj komori u odnosu na komoru sa strane dalekovoda (slika 9).

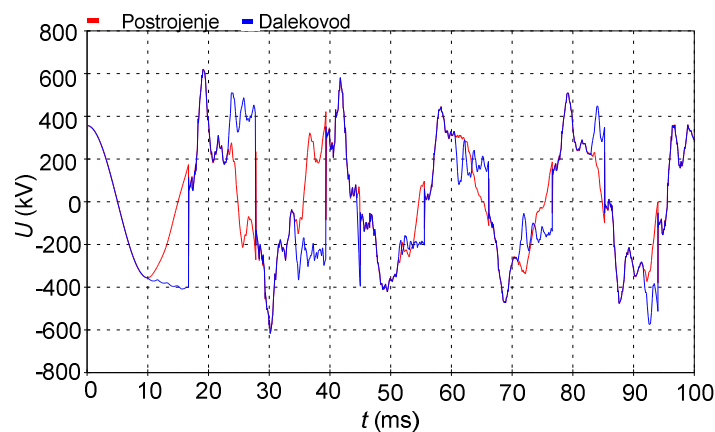


Slika 8. PPN na komori prekidača sa strane rasklopnog postrojenja



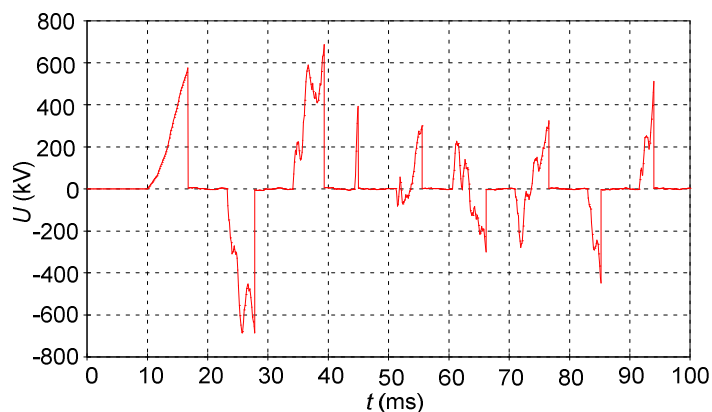
Slika 9. PPN na komori prekidača sa strane dalekovoda

Naponi na kontaktima prekidača sa strane dalekovoda i sa strane postrojenja prikazani su na slici 10, a ukupni PPN na prekidaču je prikazan na slici 11.

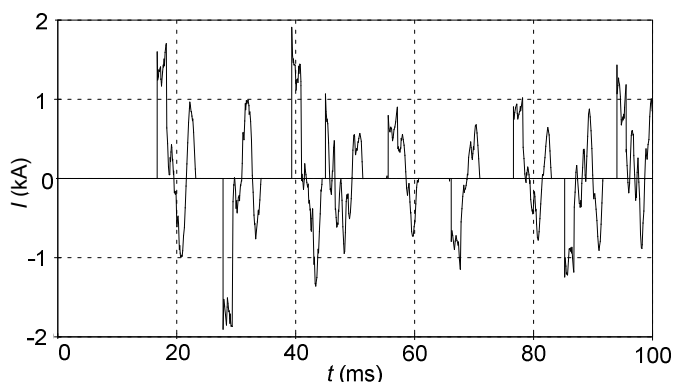


Slika 10. Naponi na kontaktima prekidača sa strane dalekovoda i sa strane postrojenja

Povratni preskoci u komorama praćeni strujom električnog luka koji se gasi i ponovno pali nekoliko puta (slika 12).



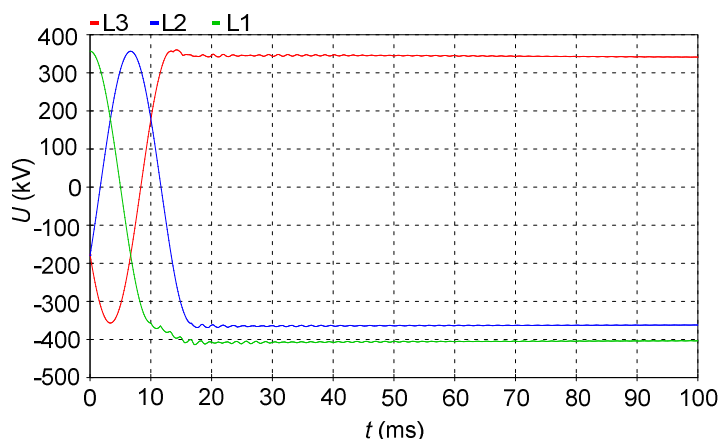
Slika 11. Ukupni PPN na kontaktima prekidača



Slika 12. Struja u prekidnoj komori sa strane postrojenja

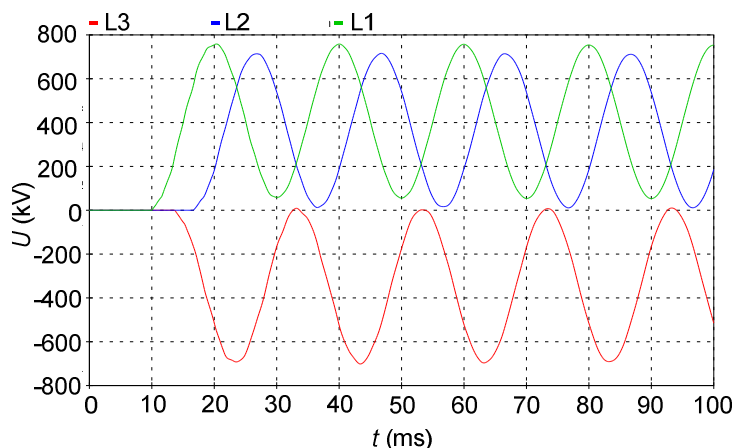
#### B) Uspješni (regularni) isklon prekidača

Prethodno prikazani model korišten je za analizu uspješnog isklona neopterećenog 400 kV dalekovoda. U slučaju uspješnog isklona neopterećenog dalekovoda električni luk se gasi u trenutku prirodnog prolaska struje kroz nulu. Slika 13 prikazuje fazne napone sa strane dalekovoda nakon uspješnog isklona dalekovoda. Napon je najveći u fazi koju je prekidač prvu isklonio zbog elektromagnetske sprege s druge dvije faze prije prekidanja struja u njima i zbog Ferrantijevog efekta.



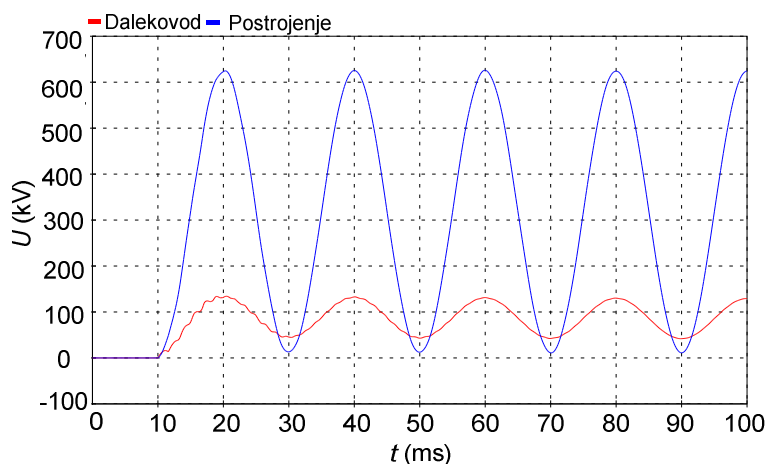
Slika 13. Fazni naponi sa strane dalekovoda nakon uspješnog isklona

Pražnjenje zaostalog naboja na dalekovodu nakon isklona je sporo zbog toga što su na njegovim krajevima ugrađeni kapacitivni naponski transformatori. Brzina pražnjenja naboja ovisi o vremenskim uvjetima, prvenstveno o vlažnosti, koja je u trenutku kvara prekidača bila niska. Dakle, preostali naboj na dalekovodu značajno utječe na PPN prekidača (slika 14).



Slika 14. PPN u slučaju uspješnog isklopa; amplitude napona:  $U_{L1}=758$  kV (2.32 p.u.),  $U_{L2}=713$  kV (2.18 p.u.),  $U_{L3}=692$  kV (2.12 p.u.)

Osim amplitude PPN-a, za dielektrična naprezanja prekidača prilikom sklapanja vrlo je važna i raspodjela napona na prekidnim komorama. Rezultati proračuna pokazuju prilično neravnomjernu raspodjelu napona na prekidnim komorama u fazi L1 u kojoj se javlja maksimalna amplituda PPN-a. (slika 15). Kako analizirani prekidač nema kondenzatore za ujednačavanje raspodjele potencijala među prekidnim komorama, veći dio povratnog napona preuzima komora bliža postrojenju.



Slika 15. Raspodjela PPN-a po prekidnim komorama prekidača

## 5. ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA

Prema [4] prekidač bi trebao između otvorenih kontakata izdržati sljedeći kratkotrajni izmjenični ispitni napon  $U_c$ :

$$U_c = \frac{U_r \cdot k_c \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

gdje je:

$U_r$  – nazivni napon 420 kV;

$k_c$  – kapacitivni naponski faktor (1.2 za kruto uzemljeno zvjezdište).

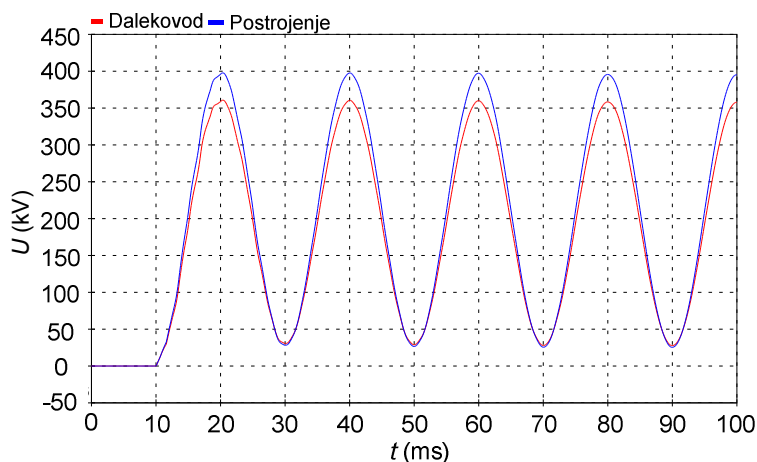
Dakle, prekidač bi trebao izdržati maksimalnu amplitudu povratnog napona 823 kV (2.4 p.u.) na otvorenim kontaktima. Izračunata maksimalna amplituda povratnog napona je samo 10 % manja od 823 kV i iznosi 758 kV - 2.2 p.u. Najveći dio (otprilike 80%) PPN-a opterećuje prekidnu komoru koja se nalazi bliže rasklopnom postrojenju.

Raspodjela napona na prekidnim komorama može se poboljšati ugradnjom kondenzatora paralelno



prekidnim komorama, koji su posebno važni kod isklapanja dugih dalekovoda.

Analiziran je utjecaj kondenzatora s kapacitetom 500 pF na raspodjelu napona na komorama. Rezultati proračuna pokazuju značajno poboljšanje raspodjele napona i smanjenje amplitude PPN-a (slika 16).



Slika 16. Raspodjela PPN-a na prekidnim komorama s paralelno ugrađenim kondenzatorima

Tablica II prikazuje usporedbu rezultata proračuna PPN-a za slučajeve bez i s ugrađenim kondenzatorima.

Tablica II. Raspodjela PPN-a na prekidnim komorama prekidača

Ukupni PPN (kV)	Amplituda PPN-a na komorama bez kondenzatora (kV)	Amplituda PPN-a na komorama s kondenzatorima (kV)
L1/758	*624/134	*398/360
L2/713	*619/94	*376/337
L3/692	*611/81	*366/326

\*Veća vrijednost odnosi se na prekidnu komoru koja se nalazi bliže rasklopnom postrojenju

Izračunate vrijednosti prikazane u tablici nisu mnogo manje od vršne vrijednosti kratkotrajnog izmjeničnog napona 863 kV kojeg prekidač treba izdržati između otvorenih kontakata [4].

U stvarnim uvjetima, osim neravnomjerne raspodjele napona na prekidnim komorama, brojni ostali faktori mogu imati utjecaj na dielektričnu čvrstoću između kontakata prekidača: brzina razmicanja kontakata, stanje SF<sub>6</sub> plina, održavanje prekidača... Navedeni faktori mogu povećati rizik pojave povratnog preskoka i kvara prekidača.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana „post mortem“ analiza kvara prekidača uslijed isklopa neopterećenog i dugog 400 kV dalekovoda. U analizi su korišteni podaci o snimljenim prijelaznim pojavama za vrijeme kvara iz sustava za praćenje kvalitete električne energije i sustava WAMS. Prema uklopnom stanju u trenutku prije nastanka kvara u programu EMTP-RV izrađen je detaljan model 400 kV postrojenja i priključenih dalekovoda. Rezultati proračuna pokazuju da je prilikom isklopa prekidača došlo do višestrukih povratnih preskoka pri čemu se električni luk u prekidnim komorama nekoliko puta palio i gasio. Do preskoka najprije dolazi na komori bližoj rasklopnom postrojenju, na koju i pri regularnom isklapanju otpada veći dio povratnog napona. Nakon preskoka na prvoj komori cijeli povratni napon prelazi na drugu komoru i u njoj izaziva preskok. U daljnjem tijeku ove pojave dolazi do uzastopnih preskoka pri sve nižim naponima, nakon čega prekidač više nije uspio ugasiti luk koji je uzrokovao njegovo uništenje.

Slični valni oblici napona i struja snimljeni su uređajima za praćenje kvalitete električne energije koji se priključuju na sekundare strujnih i naponskih transformatora te nisu predviđeni ni ispitani za prenošenje visokofrekvencijskih pojava, što treba imati na umu kod interpretacije mjernih oscilograma.

Analiziran je utjecaj ugradnje kondenzatora na raspodjelu napona na komorama. Rezultati proračuna u ovom slučaju pokazuju značajno poboljšanje raspodjele napona i smanjenje amplitude PPN-a.

## 7. LITERATURA

- [1] Ruben D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers, Design and Applications", CRC Press, 2<sup>nd</sup> edition, 1996.
- [2] J.C. Henry, G. Perrissin, C. Rollier, "The behaviour of SF6 puffer circuit-breakers under exceptionally severe conditions", Cahiers Techniques, Schneider Electric, no. 101 / p.2, 2002.
- [3] CIGRE Working Group 13.04 of Study Committee 13, "State of the art – capacitive current switching", Electra, No. 155, August 1994.
- [4] IEC 62271-100: High-voltage switchgear and controlgear; High-voltage alternating-current circuit-breakers, 2003.
- [5] R. W. Alexander, D. Dufournet, Transient recovery voltages (TRVs) for high-voltage circuit breakers, IEEE Tutorial, October 16<sup>th</sup> 2008, Calgary, Canada.
- [6] CIGRE, Working Group 13.01 of Study Committee 13: State of the Art of Circuit-Breaker Modelling, December 1998.
- [7] EMTP-RV, documentation, WEB site [www.emtp.com](http://www.emtp.com).
- [8] Ali F. Imece, D. W. Durbak, H. Elahi, S. Kolluri, A. Lux, D. Mader, T. E. McDemott, A. Morched, A. M. Mousa, R. Natarajan, L. Rugeles, and E. Tarasiewicz, "Modeling guidelines for fast front transients", Report prepared by the Fast Front Transients Task Force of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996.