

9. savjetovanje HRO CIGRÉ
Cavtat, 8. - 12. studenoga 2009.

Ivo Uglešić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu
ivo.uglesic@fer.hr

Božidar Filipović-Grčić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr

Branimir Đikić
RAVEL d.o.o. Zagreb
branimir.dikic@ravel.hr

PRIJELAZNI POVRATNI NAPON NA 400 kV SF₆ PREKIDAČU PRI PREKIDANJU BLISKOG KRATKOG SPOJA

SAŽETAK

Prijelazni povratni napon (PPN) javlja se na stezaljkama prekidača prilikom prekidanja kvara, neposredno nakon gašenja električnog luka. Analiziran je utjecaj dispozicije dalekovodnog polja i kondenzatora ugrađenih paralelno prekidnim komorama prekidača na oblik PPN-a sa strane dalekovoda u 400 kV postrojenju, pri prekidanju bliskog kratkog spoja. U periodu uspostavljanja PPN-a sa strane voda do pojave amplitude prvog naponskog vrha, koji traje nekoliko mikrosekundi, postoji opasnost od pojave termičkog proboja u SF₆ prekidaču.

PPN je izračunat prema IEC standardu i pomoću programa EMTP-ATP. Prikazano je detaljno modeliranje električnog luka u SF₆ prekidačima. Simulacijama u EMTP-u je određeno mjesto bliskog kratkog spoja na kojem je strmina početnog PPN-a najveća. Uspoređeni su rezultati proračuna iz simulacija u EMTP-u i proračuna prema IEC-u.

Ključne riječi: prijelazni povratni napon, bliski kratki spoj, SF₆ prekidač, model električnog luka, proračuni u EMTP-ATP-u

TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE OF 400 kV SF₆ CIRCUIT BREAKER WHEN CLEARING SHORT-LINE FAULT

SUMMARY

Transient recovery voltage (TRV) is the voltage across the opening contacts of a fault-interrupting circuit breaker immediately after the electric arc is extinguished. Influence of grading capacitors and line bay disposition on the TRV waveform on the side of the line in a 400 kV substation is analyzed for the short-line fault (SLF) conditions. In the transitional period of establishing TRV on the line side to the first peak, which runs several microseconds, there is a danger for appearance of thermal breakdown in SF₆ circuit breaker.

TRV is calculated according to the IEC standards and using the EMTP-ATP software. Modelling of electric arc for the SF₆ circuit breaker is presented. Fault location at which the rate of rise of recovery voltage (RRRV) is the highest was determined using the EMTP-ATP simulations. Results obtained according to the IEC standards and using the EMTP-ATP are compared.

Key words: transient recovery voltage, short-line fault, SF₆ circuit breaker, electric arc model, EMTP-ATP simulations

1. UVOD

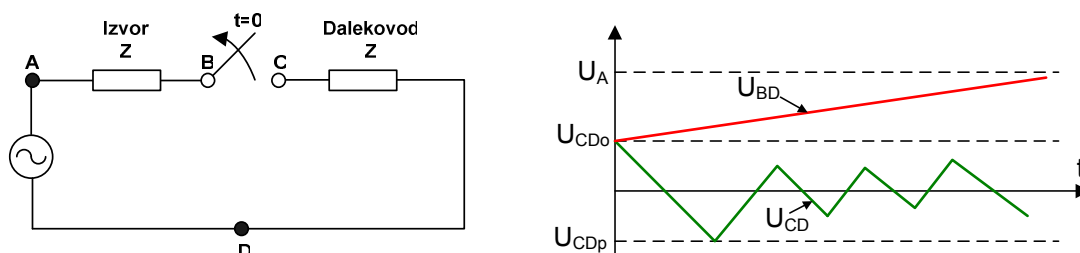
Pojava kratkog spoja na nadzemnom vodu relativno blizu prekidača (bliski kratki spoj) karakterizirana je oscilacijom PPN-a sa strane voda. Ova oscilacija uzrokovana je kratkom dužinom voda između prekidača i mjesta nastanka kratkog spoja, a poznata je pod nazivom "pilasta oscilacija" upravo zbog visokofrekvencijskog karaktera pojave (i do 200 kHz) i relativno oštih vrhova. Iako je struja kratkog spoja u ovom slučaju nešto niža od kratkospojne prekidne moći prekidača, prekidanje bliskog kratkog spoja je izuzetno težak režim rada za visokonaponske prekidače, posebno za moderne SF₆ prekidače, upravo zbog velike strmine PPN-a u početnom dijelu koju prouzrokuje visokofrekvencijska oscilacija sa strane voda. U periodu uspostavljanja PPN-a sa strane voda do prvog vrha koji traje nekoliko mikrosekundi postoji opasnost od pojave termičkog proboja u SF₆ prekidaču, što može imati i teške posljedice kako za sam prekidač tako i za sustav [1]. Upravo zbog toga su međunarodne IEC preporuke precizno definirale oblik PPN-a sa strane voda pri ispitivanju prekidača u uvjetima bliskog kratkog spoja [2].

U ovoj članku analiziran je utjecaj dispozicije 400 kV postrojenja vodnog polja na oblik PPN-a pri prekidanju bliskog kratkog spoja.

2. BLISKI KRATKI SPOJ

Pod pojmom bliski kratki spoj podrazumijeva se kratki spoj koji je nastao na udaljenosti od obično nekoliko kilometara od prekidača. Iako se radi o manjem iznosu struje u odnosu na struju koju prekidač prekida u slučaju sabirničkog kratkog spoja, može se dogoditi da prekidač ne uspije prekinuti tu struju. Razlog tome leži prvenstveno u velikoj strmini povratnog napona [3].

Napon na strani voda $U_{CD}(t)$ ima pilasti oblik (slika 1.), a posljedica je refleksije naponskih putnih valova na vodu. Naponski putni valovi nastaju tako da se u trenutku prekidanja struje oslobođeni naboj voda raspada na dva jednaka dijela (s pilastom razdiobom potencijala duž voda) koji se kreću po vodu u suprotnim smjerovima brzinom $v=3 \cdot 10^8$ m/s. Na otvorenom kraju voda putni val se reflektira s istim predznakom, a na kratkospojenom kraju voda s obrnutim predznakom.



Slika 1. PPN pri bliskom kratkom spoju (U_{BD} – napon sa strane izvora, U_{CD} – napon sa strane dalekovoda)

U praksi je pilasti oblik PPN-a u određenoj mjeri deformiran zbog postojanja dodatnih kapaciteta na stezaljkama prekidača (npr. kapaciteta naponskih i strujnih transformatora i sl.), a isto tako je i vrh oscilacija lagano zaobljen. Napon sa strane voda ima veliki utjecaj na strminu PPN-a na prekidaču, dok se napon sa strane izvora u početnom trenutku vrlo sporo mijenja.

3. MODELIRANJE

3.1. Modeliranje električnog luka u SF₆ prekidačima

Budući da električni luk predstavlja nezaobilazan element pri prekidanju struje u elektroenergetskim strujnim krugovima nastoji se što točnije matematički modelirati međudjelovanje električnog luka i strujnog kruga za vrijeme procesa prekidanja struje. Danas općenito postoje dvije osnovne skupine modela električnog luka: modeli crne kutije (black-box models) i fizikalni modeli. Black-box modeli opisuju električni luk kao element strujnog kruga čija se električna vodljivost mijenja sa strujom i naponom, a fizikalni modeli nastoje podrobno obuhvatiti sve fizikalne procese koji se zbivaju za vrijeme gorenja električnog luka [4].

Glavni cilj black-box modela je opisivanje međudjelovanja električnog luka i odgovarajućeg strujnog kruga tijekom prekidnog procesa. Osnovna svrha modela sastoji se u uporabi oscilograma struje

i napona (dobivenih tijekom laboratorijskog ispitivanja prekidne moći) zajedno s odgovarajućim diferencijalnim jednadžbama kako bi se izveo matematički model električnog luka.

Tako izveden model moguće je onda koristiti za predviđanje prekidnih karakteristika prekidača u realnim strujnim krugovima. Black–box modeli pokrivaju termičku fazu prekidnog procesa, a njeno trajanje ovisi o samom prekidnom procesu i o vrsti medija za gašenje. Najčešće se koriste kod proračuna prekidanja bliskog kratkog spoja i sklapanja malih induktivnih struja. Za modeliranje električnog luka korištena je Schwarz /Avdoninova diferencijalna jednadžba:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{T(g)} \cdot \left[\frac{u \cdot i}{P(g)} - 1 \right] \quad (1)$$

gdje je:

g – električna vodljivost luka;

u – napon luka;

i – struja luka;

P – snaga hlađenja luka;

T – vremenska konstanta luka.

P i T su funkcije vodljivosti luka g . Prema tome, vodljivost luka koju određuju razdioba temperature i veličina lučnog stupca, uzeta je za kvantitativno prikazivanje fizikalne slike luka. Model se koristi ili u općem obliku bez specifikacija funkcijski ovisnih parametara P , T ili u obliku s određenim analitičkim funkcijama $P(g)$, $T(g)$:

$$T(g) = T_0 \cdot g^\alpha = 1.5 \mu s \cdot g^{0.17} \quad (2)$$

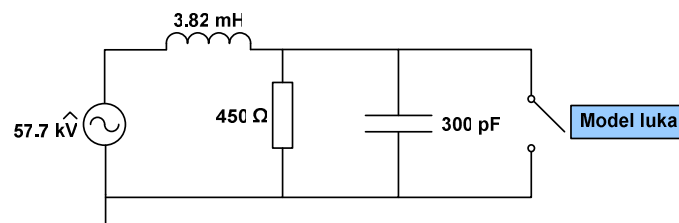
$$P(g) = P_0 \cdot g^\beta = 4 MW \cdot g^{0.68} \quad (3)$$

U jednadžbama (2) i (3) A , B , α , β su konstante.

Analitičke funkcije $P(g)$ i $T(g)$ pokazuju vrlo dobro slaganje s eksperimentalno određenim funkcijama. Poimanje parametara P i T kao funkcija g (ili i) daje jednadžbe koje dovoljno točno mogu opisati rezultate dobivene mjerenjima. Upravo zbog toga ovaj koncept se danas najčešće koristi u praksi za proračune ponašanja luka u visokonaponskim prekidačima. Diferencijalna jednadžba (1) može se uspješno riješiti ako se promatra dovoljno mali vremenski interval Δt u kojemu su P i T konstantni. Diferencijalna jednadžba riješena je numerički Eulerovom metodom za diferencijalne jednadžbe prvog reda. Rješenje diferencijalne jednadžbe:

$$g(t + \Delta t) = g(t) + \left(\frac{i^2}{P_0 \cdot g(t)^\beta} - g(t) \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T(g)}} \right) \quad (4)$$

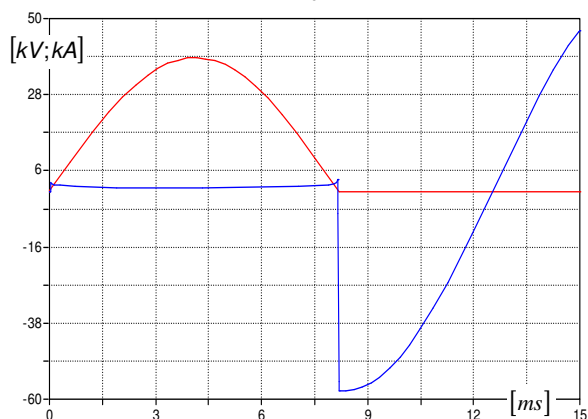
Testni krug u kojem prekidač prekida struju kvara je odabran što jednostavnije kako bi se uklonili nepoželjni utjecaji [5]. S obzirom da je vremenska konstanta funkcija vodljivosti, a u trenutku prolaska kroz nulu iznosi $0,4 \mu s$, iz toga se dobiju parametri luka dani u opisu slike 2.



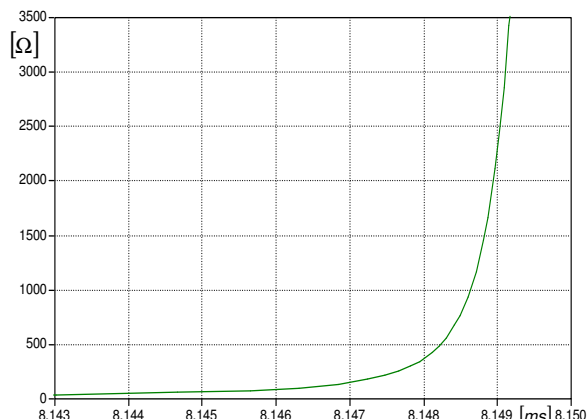
Slika 2. Testni krug (60 Hz) i model luka, snaga hlađenja luka: $P_0 = 4 MW$ i $\beta = 0.68$; vremenska konstanta luka: $T_0 = 1.5 \mu s$ i $\alpha = 0.17$.

Slike 3. do 8. prikazuju izračunati napon, struju i otpor luka te usporedbu sa referentnim modelima. Korak proračuna je bio $10 ns$. Odabir ispravnog vremenskog koraka je vrlo bitan, npr. ukoliko se odabere 10 puta veći vremenski korak luk se neće ugaziti i diferencijalna jednadžba će dati kriva

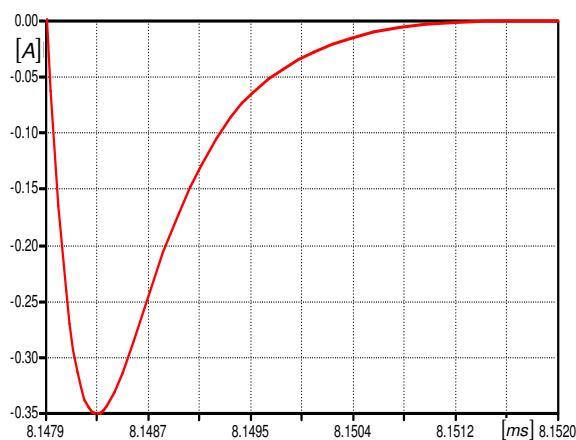
rješenja. Početni otpor luka iznosio je 0.0001 Ω . Otvaranje kontakata prekidača počelo je u trenutku $t=0$ ms – u maksimumu napona faze A.



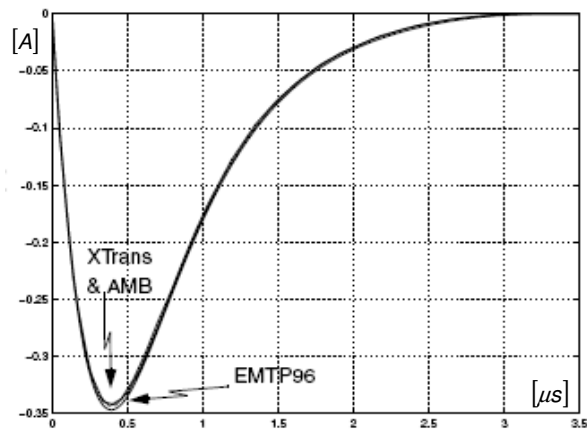
Slika 3. Struja (crveno) i napon luka (plavo)
 $I_{max} = 38.66$ kA



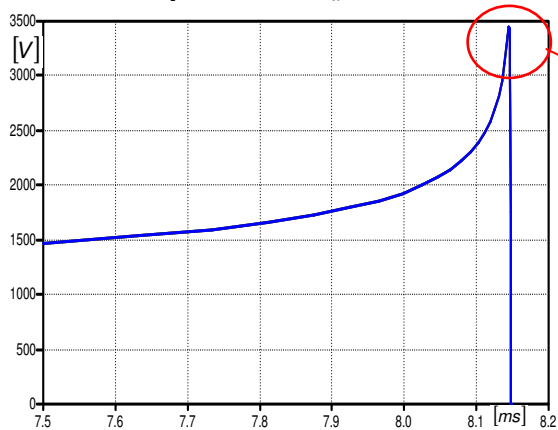
Slika 4. Otpor luka u $[\Omega]$



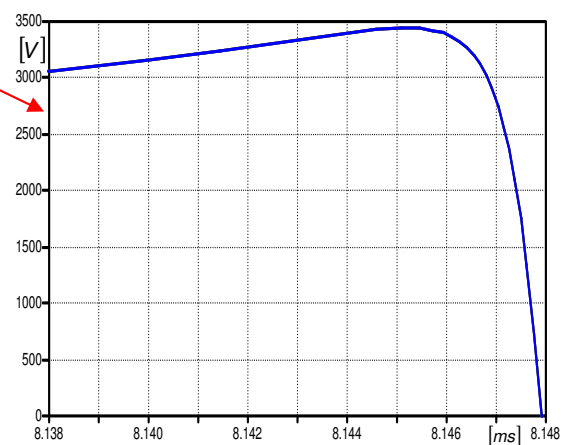
Slika 5. Struja nakon prolaska kroz nulu - detalj: razvijeni model, $I_{max}=-0.35$ A



Slika 6. Struja nakon prolaska kroz nulu - detalj: usporedba sa referentnim modelima [5]



Slika 7. Napon luka: razvijeni model

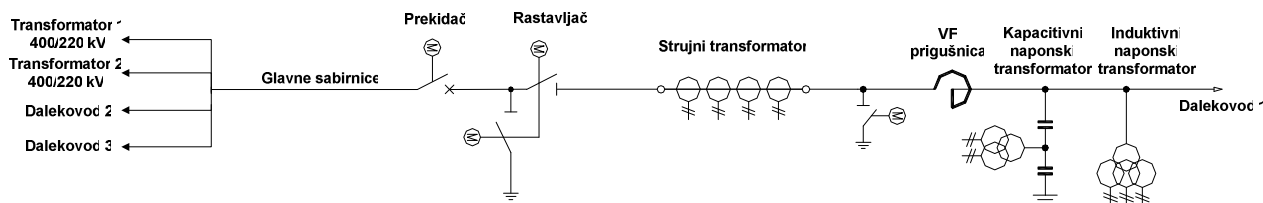


Slika 8. Napon luka – detalj: razvijeni model
 $U_{max}=3442$ V

Porast otpora od 10 Ω do 3500 Ω traje kod SF₆ prekidača otprilike 0.018 ms.

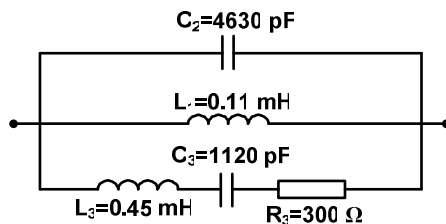
3.2. Modeliranje postrojenja i dalekovoda

Modelirano je 400 kV dalekovodno polje 1 sa slike 9., dio postrojenja (glavne sabirnice i potporni izolatori) i mrežni ekvivalenti ostalih dalekovodnih i transformatorskih polja. U proračunima su mrežni ekvivalenti modelirani impedancijama kratkog spoja, koje su određene iz struja kratkog spoja.



Slika 9. Dalekovodno polje 400 kV

Utjecaj VF prigušnice na oblik PPN-a sa strane voda je uzet u obzir u proračunima. Na slici 10. je prikazan model VF prigušnice koji je korišten u proračunima.



Slika 10. Model VF prigušnice

Iznosi parametara VF prigušnice: $L_1=0.11$ mH, $C_2=4630$ pF, $R_3=300$ Ω , $L_3=0.45$ mH, $C_3=1120$ pF. VF prigušnica se nalazi u fazi A i B. Dalekovod je modeliran trofazno pomoću nadomjesne PI-sheme, pri čemu se zadaju otpor R (Ω/m), induktivitet L (mH/m) i kapacitet C ($\mu F/m$) voda i njegova duljina.

Tablica I. Podaci o sabirnicama i spojnim vodovima:

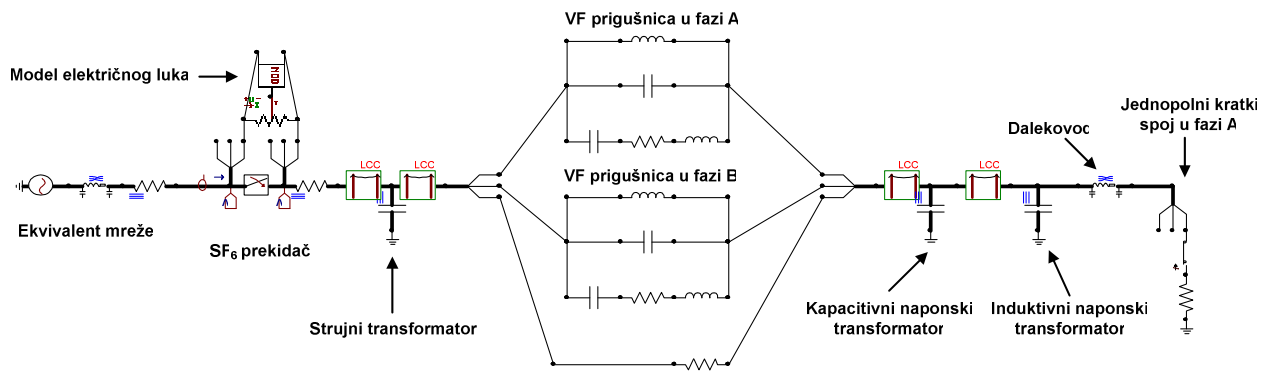
Spojni vodovi: Al/Ce 2x490/110 mm ²	Sabirnice: Cijevi E-AlMgSi - Ø100x8 mm
Vanjski polumjer vodiča: $R_v=15.925$ mm.	Vanjski polumjer: $R_v=50$ mm.
Čelična jezgra: 19 vodiča promjera 2.73 mm.	Unutarnji polumjer: $R_u=42$ mm.
Unutarnji polumjer vodiča: $R_u=6.825$ mm.	Duljina: $l=18$ m.
Srednji omski otpor pri 20 °C: 0.0592 Ω/km .	Razmak između faza: 8.2 m.
Razmak između vodiča: 40 cm.	Visina sabirnice iznad zemlje: 7.76 m.
Prosječna visina vodiča iznad tla: 7.34 m.	Površina presjeka sabirnice: 2312 mm ² .
	Srednji omski otpor (pri 20 °C) za glavne sabirnice: 0.014485 Ω/km .

Podaci iz Tablice I. su uneseni u LCC model u EMTP-u [6] u kojem se izračunava induktivitet sabirnica i spojnih vodova, njihov kapacitet prema zemlji i kapaciteti između pojedinih faza. Korišten je JMarti frekvencijski ovisan model. Za specifični otpor tla je usvojena vrijednost od $\rho=300$ Ωm . U simulacijama su elementi dalekovodnog polja modelirani koncentriranim kapacitetima: strujni mjerni transformator - 680 pF, kapacitivni naponski mjerni transformator - 4400 pF, induktivni naponski mjerni transformator - 550 pF, rastavljač - 200 pF [7].

4. REZULTATI PRORAČUNA

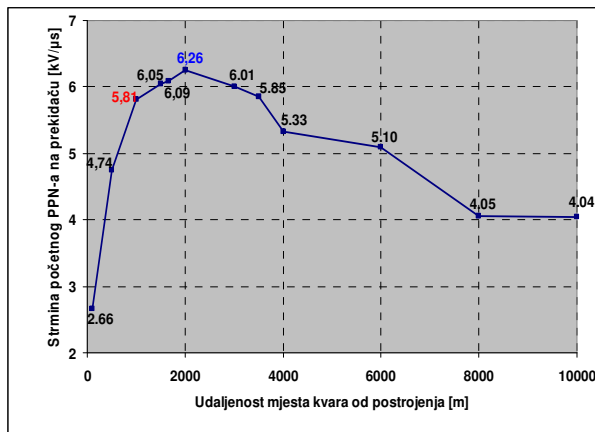
4.1. Proračun prijelaznog povratnog napona prema IEC-u

Da bi 400 kV prekidač nazivne kratkospojne prekidne moći 40 kA_{eff} zadovoljio u uvjetima bliskog kratkog spoja prema standardu IEC 62271-100 [2], on treba moći prekinuti struju bliskog kratkog spoja od 36 kA, ako je u ciklusu L_{90} (pri struji jednakoj 90% nazivne kratkospojne prekidne moći prekidača) podvrgnut PPN-u koji je propisan po IEC-u i čija strmina iznosi oko 7.2 kV/ μs . Ovu strminu moguće je izračunati analitičkim izrazima prema IEC-u. Nadomjesnim ekvivalentom mreže određena je u postrojenju struja kratkog spoja od 40 kA (slika 11.). Napravljeni su proračuni kratkog spoja na različitim udaljenostima od postrojenja kako bi se utvrdila strmina početnog PPN-a sa strane voda pri struji od 36 kA, kao i "kritična udaljenost" mjesta kvara od postrojenja koja odgovara ciklusu L_{90} za ispitivanje 400 kV prekidača kratkospojne prekidne moći 40 kA_{eff}. Određena je i udaljenost mjesta kvara pri kojoj se javlja najveća strmina PPN-a sa strane voda.

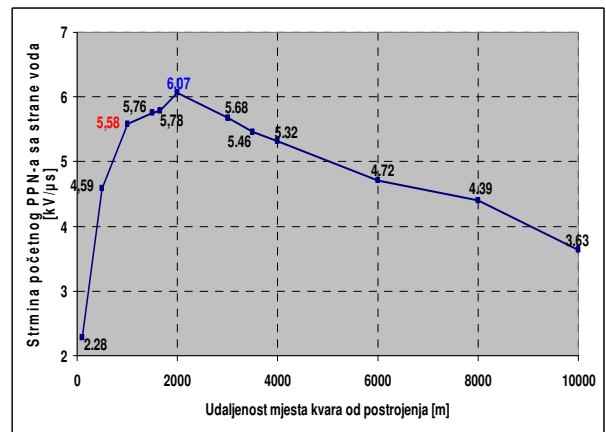


Slika 11. Trofazni model 400 kV vodnog polja za određivanje PPN-a prema IEC-u

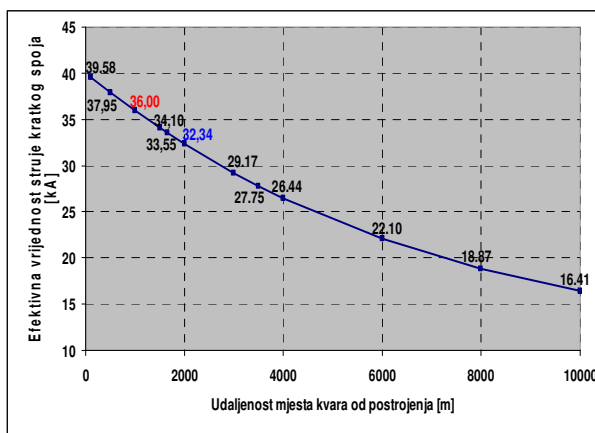
U obzir je uzet model električnog luka u prekidaču. Provedeno je ukupno 12 simulacija jednofaznog bliskog kratkog spoja u fazi A na različitim udaljenostima od postrojenja. Kratki spoj nastaje u trenutku $t=0$ s – napon u fazi A maksimalan. Slike 12. do 15. prikazuju rezultate proračuna. Pri struji bliskog kratkog spoja u iznosu od 36 kA strmina početnog PPN-a sa strane voda iznosi 5.5810 kV/ μ s ako kvar nastane na "kritičnoj" udaljenosti od 1000 m od postrojenja. Strmina početnog PPN-a na prekidaču u tom slučaju iznosi 5.8085 kV/ μ s.



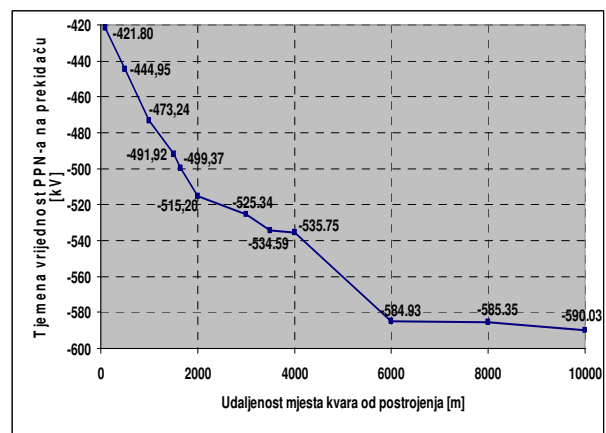
Slika 12. Strmina početnog PPN-a na prekidaču u ovisnosti o udaljenosti mjesta kvara od postrojenja



Slika 13. Strmina početnog PPN-a sa strane voda u ovisnosti o udaljenosti mjesta kvara od postrojenja

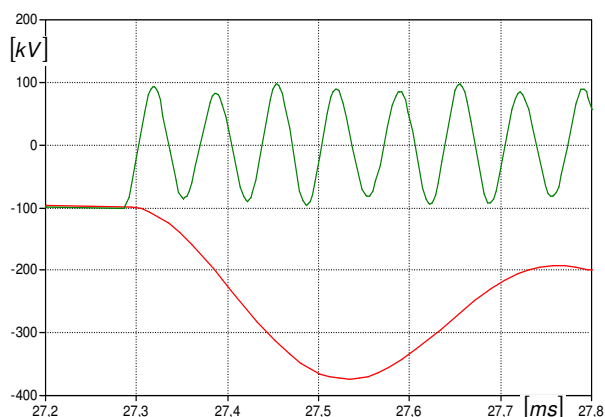


Slika 14. Efektivna vrijednost struje u ovisnosti o udaljenosti mjesta kvara od postrojenja

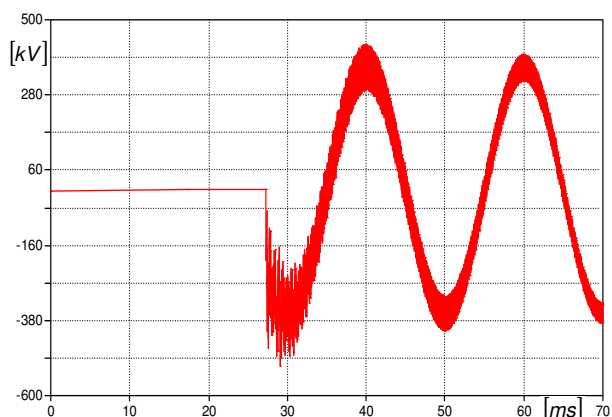


Slika 15. Tjemena vrijednost PPN-a na prekidaču u ovisnosti o udaljenosti mjesta kvara od postrojenja

Najveća strmina PPN-a sa strane voda u iznosu od 6.0702 kV/ μ s (slika 16.) javlja se ako se kvar dogodi na odaljenosti 2000 m od postrojenja (pri struji kratkog spoja od 32.34 kA). Na prekidaču je u tom slučaju maksimalni iznos napona od -515.20 kV (slika 17.).



Slika 16. Komponenta PPN-a sa strane voda (zeleno - strmina početnog PPN-a $s=6.0702 \text{ kV}/\mu\text{s}$) i sa strane mreže (crveno)

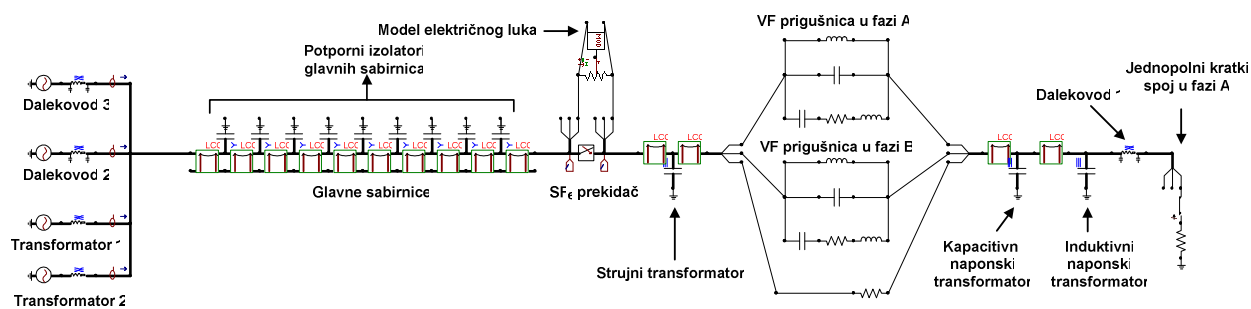


Slika 17. PPN na prekidaču u fazi A, $U_{\text{max}}=-515.20 \text{ kV}$

Ako se udaljenost mjesta kvara od postrojenja povećava na iznose veće od 2000 m, strmina PPN-a pada, a smanjuje se i iznos struje kratkog spoja. Isto tako za sve udaljenosti manje od 2000 m strmina se smanjuje, a struja kratkog spoja raste.

4.2. Proračun prijelaznog povratnog napona u realnom pogonskom stanju

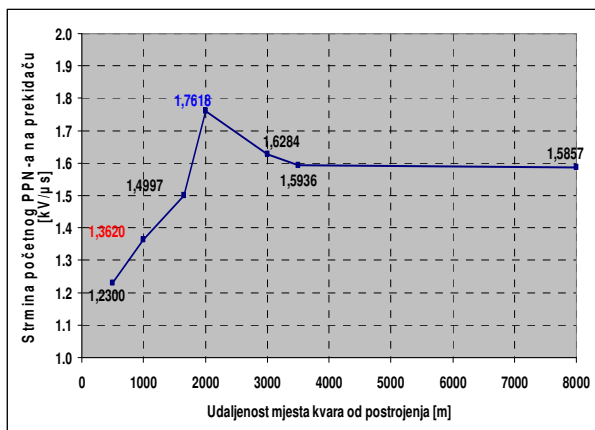
Proveden je proračun PPN-a u realnom pogonskom stanju pri bliskom kratkom spoju u dalekovodnom polju (slika 18.). Modeliran je dio postrojenja iza prekidača prema postrojenju: glavne sabirnice, potporni izolatori, ostala vodna i transformatorska polja (pretpostavljeno je potpuno uklopno stanje postrojenja).



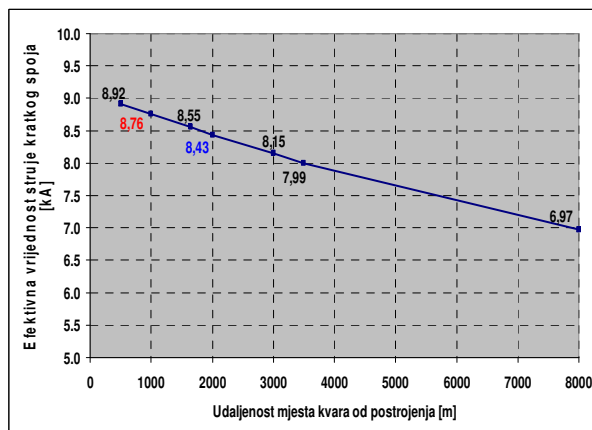
Slika 18. Trofazni model 400 kV vodnog polja za proračun PPN-a u realnom pogonskom stanju

U stvarnom pogonskom stanju pri bliskom kratkom spoju na "kritičnoj" udaljenosti od 1000 m (pri struji $8.76 \text{ kA}_{\text{eff}}$), sa strane voda se javlja početni PPN strmine $1.3418 \text{ kV}/\mu\text{s}$, a na prekidaču ta strmina iznosi $1.3620 \text{ kV}/\mu\text{s}$ (slika 19.).

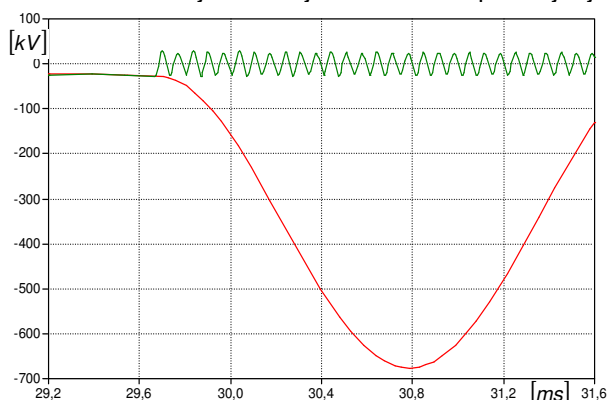
Provedene simulacije za različite udaljenosti mjesta kratkog spoja od postrojenja pokazuju da se maksimalna strmina PPN-a od $1.6943 \text{ kV}/\mu\text{s}$ sa strane voda javlja pri struji od $8.43 \text{ kA}_{\text{eff}}$, na udaljenosti 2000 m (slika 20.). Na prekidaču se u tom slučaju javlja maksimalna strmina PPN-a od $1.7618 \text{ kV}/\mu\text{s}$ i maksimalni iznos napona od -699.90 kV (slika 21. i 22.).



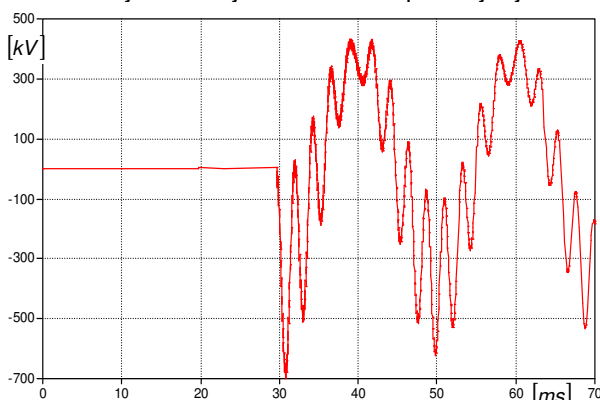
Slika 19. Strmina početnog PPN-a na prekidaču u ovisnosti o udaljenosti mjesta kvara od postrojenja



Slika 20. Efektivna vrijednost struje u ovisnosti o udaljenosti mjesta kvara od postrojenja



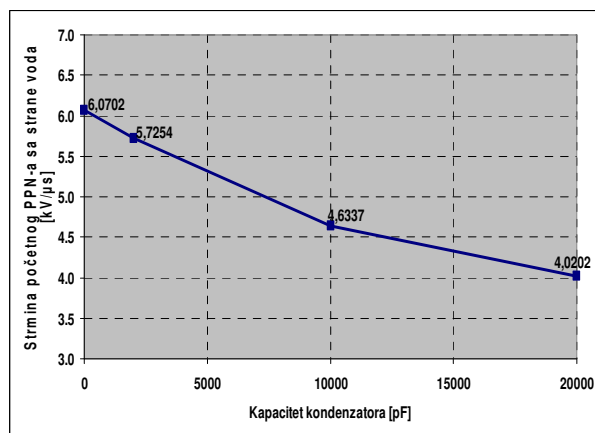
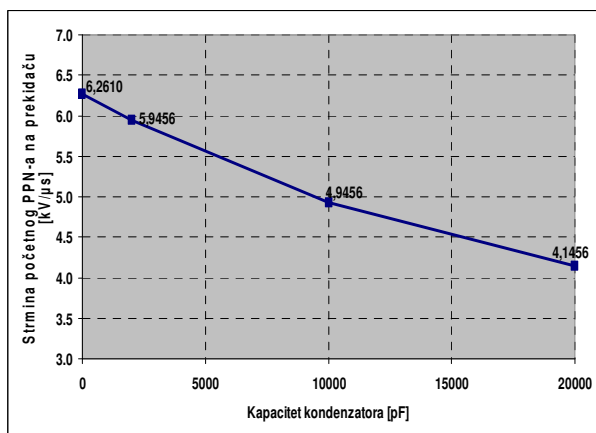
Slika 21. Komponenta PPN-a sa strane voda (zeleno - strmina početnog PPN-a $s=1.6943$ kV/μs) i sa strane mreže (crveno)



Slika 22. PPN na prekidaču u fazi A
 $U_{\max}=-699.90$ kV

4.3. Utjecaj kondenzatora ugrađenih paralelno prekidnim elementima prekidača na strminu prijelaznog povratnog napona

Moderni SF₆ prekidači opremljeni su kondenzatorima koji su ugrađeni paralelno prekidnim elementima u cilju ravnomjerne raspodjele napona te povećanja prekidne moći prekidača u uvjetima bliskog kratkog spoja. Kondenzatori direktno utječu na smanjenje početne strmine PPN-a na prekidaču.

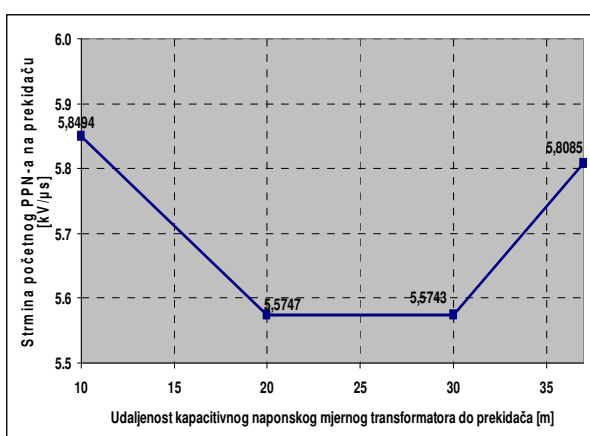


Slika 23. Utjecaj kapaciteta kondenzatora ugrađenih paralelno prekidnim elementima prekidača na strminu PPN-a na a) prekidaču i b) sa strane voda

Da bi se sagledao utjecaj kapaciteta kondenzatora koji su postavljeni paralelno prekidnim elementima prekidača analiziran je slučaj bliskog kratkog spoja na udaljenosti od 2000 m pri struji kratkog spoja od 32.34 kA_{eff}. Rezultati proračuna prikazani su slikom 23. Ugrađeni kondenzator smanjuje strminu PPN-a, što uvelike povećava prekidnu moć prekidača i pomaže prekidaču prilikom prekidanja bliskog kratkog spoja.

4.4. Utjecaj udaljenosti kapacitivnog naponskog mjernog transformatora od prekidača na strminu prijelaznog povratnog napona

Kapacitet primara kapacitivnog naponskog mjernog transformatora (4400 pF) predstavlja najznačajniji kapacitet u dalekovodnom polju i svakako je interesantno istražiti utjecaj njegove udaljenosti od prekidača na oblik PPN-a sa strane voda i na prekidaču. U stvarnosti je naponski mjerni transformator udaljen oko 37 m od prekidača. Utjecaj je analiziran u uvjetima velikih struja kratkog spoja (40 kA_{eff} u postrojenju). U tu svrhu analiziran je kratki spoj na "kritičnoj" udaljenosti od 1000 m – struja kratkog spoja 36 kA_{eff}. Rezultati proračuna prikazani su slikom 24.



Slika 24. Utjecaj kapaciteta udaljenosti kapacitivnog naponskog mjernog transformatora od prekidača na strminu PPN-a na prekidaču

Strmina PPN-a na prekidaču se smanjuje sa smanjenjem udaljenosti između prekidača i kapacitivnog naponskog mjernog transformatora. Na udaljenosti od 30 m strmina PPN-a na prekidaču je minimalna, a daljnjim smanjenjem udaljenosti strmina se povećava.

5. ZAKLJUČAK

U članku je analiziran utjecaj dispozicije 400 kV dalekovodnog polja na oblik PPN-a sa strane voda pri prekidanju bliskog kratkog spoja. Iako se radi o manjem iznosu struje u odnosu na struju koju prekidač prekida u slučaju sabirničkog kratkog spoja, može se dogoditi da prekidač ne uspije prekinuti tu struju. Razlog tome leži prvenstveno u velikoj strmini povratnog napona.

Izračunata je kritična udaljenost bliskog kratkog spoja pri kojoj se javlja maksimalna strmina početnog PPN-a na prekidaču. Ovu strminu moguće je izračunati analitičkim izrazima prema IEC-u i ona za 400 kV SF₆ prekidač pri struji bliskog kratkog spoja od 36 kA iznosi 7.2 kV/μs. Proračun prema IEC-u proveden je i u EMTP-u na način da je detaljno modelirano dalekovodno polje, a nadomjesnim ekvivalentom mreže određena je struja kratkog spoja od 40 kA u postrojenju. Pri struji bliskog kratkog spoja u iznosu od 36 kA strmina PPN-a na prekidaču iznosi 5.8085 kV/μs ako kvar nastane na udaljenosti od 1000 m od postrojenja. Razlike u rezultatima proračuna nastaju zbog razlike u modelima (proračun prema IEC-u ne uzima u obzir otpor luka u prekidaču i detaljno modeliranje postrojenja). Prema rezultatima proračuna u EMTP-u, najveća strmina PPN-a sa strane voda u iznosu od 6.0702 kV/μs javlja se ako se kvar dogodi na udaljenosti 2000 m od postrojenja (pri struji kratkog spoja od 32.34 kA).

Prema IEC-u određuje se maksimalna strmina početnog PPN-a, u uvjetima kada se na sabirnicama postrojenja pri kratkom spoju javlja struja koja je jednaka nazivnoj prekidnoj moći prekidača 40 kA_{eff}. Maksimalna strmina početnog PPN-a izračunata je u realnom pogonskom stanju (pri manjim strujama kratkog spoja). Provedene simulacije za različite udaljenosti mjesta kratkog spoja od postrojenja su pokazale da se maksimalna strmina PPN-a od 1.6943 kV/μs sa strane voda javlja pri struji od 8.43 kA_{eff}, na udaljenosti 2000 m. Na prekidaču se u tom slučaju javlja maksimalna strmina PPN-a od

1.7618 kV/ μ s. Prekidač bi trebao prekinuti sve struje kvara koje se javljaju pri bliskom kratkom spoju s obzirom da je strmina PPN-a na prekidaču i sa strane voda manja od one koja je propisana u IEC-u. Također, stvarni iznos struje kratkog spoja u 400 kV postrojenju je u ovom slučaju daleko manji od 36 kA, pa to dodatno garantira uspješno prekidanje struje kratkog spoja.

Analiziran je i utjecaj dodatnih kondenzatora koji se ugrađuju paralelno prekidnim elementima prekidača na strminu PPN-a. Iz rezultata proračuna vidi se da ugrađeni kondenzator smanjuje strminu PPN-a, što uvelike povećava prekidnu moć prekidača i pomaže prekidaču prilikom prekidanja bliskog kratkog spoja.

Analiziran je utjecaj udaljenosti kapacitivnog naponskog mjernog transformatora (4400 pF) od prekidača na oblik PPN-a. Strmina PPN-a na prekidaču se smanjuje sa smanjenjem udaljenosti između prekidača i kapacitivnog naponskog mjernog transformatora. Na udaljenosti od 30 m strmina PPN-a na prekidaču je minimalna, a daljnjim smanjenjem udaljenosti strmina se povećava.

6. LITERATURA

- [1] R. D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers, Design and Applications", Dekker, ISBN: 0-8247-9821-X.
- [2] IEC 62271-100: "High-voltage switchgear and controlgear", High-voltage alternating-current circuit-breakers, 2003.
- [3] R.W.Alexander, D.Dufournet, "Transient recovery voltages (TRVs) for high-voltage circuit breakers", IEEE Tutorial, October 16th 2008, Calgary, Canada.
- [4] CIGRE, Working Group 13.01 of the Study Committee 13, "State of the Art of Circuit-Breaker Modelling", December 1998.
- [5] P. H. Schavemaker, L.Van Der Sluis, "The Arc model Blockset", Proceedings of the Second IASTED International Conference, POWER AND ENERGY SYSTEMS (EuroPES), June 25-28, 2002, Crete, Greece.
- [6] L. Prikler, H.K. Høidalen, "ATP Draw User's Manual", SEfAS TR A4790, ISBN 82-594-1358-2, Oct. 1998.
- [7] 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, "Modelling guidelines for fast front transients", Report prepared by the Fast Front Transients Task Force of the IEEE Modelling and Analysis of System Transients Working Group, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996.