

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

Stjepan Štefan
Končar – Niskonaponske sklopke i prekidači
stjepan.stefan@koncar-nsp.hr

MODEL ELEKTRIČNOG LUKA U SF₆ PREKIDAČU PRI PREKIDANJU INDUKTIVNIH STRUJA

SAŽETAK

Prekidači su dimenzionirani za brzo i sigurno prekidanje velikih induktivnih struja, bez apsorpcije prevelikih energija u prekidnim komorama. Prijelazni povratni napon (PPN) javlja se na stezaljkama prekidača prilikom prekidanja kratkog spoja, neposredno nakon gašenja električnog luka. Prekidačima se mogu sklapati i male induktivne struje u slučajevima sklapanja induktivnih tereta (sklapanje neopterećenog transformatora ili visokonaponske prigušnice).

U radu je razvijen model električnog luka u SF₆ prekidaču u programu za proračun elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP-RV. Model električnog luka primijenjen je pri isklapanju 400 kV prigušnice snage 100 MVar (isklapanje malih induktivnih struja) te pri prekidanju bliskog kratkog spoja u 400 kV mreži (isklapanje velikih induktivnih struja). Analiziran je utjecaj različitih modela prekidača na iznose prenapona na prigušnici pri prekidanju malih induktivnih struja i na iznos prijelaznog povratnog napona na prekidaču pri prekidanju struje bliskog kratkog spoja.

Ključne riječi: model električnog luka, prijelazni povratni napon, prekidanje malih induktivnih struja, nestabilnost električnog luka

SF₆ CIRCUIT BREAKER ELECTRIC ARC MODEL FOR INTERRUPTION OF INDUCTIVE CURRENTS

SUMMARY

Circuit breakers are dimensioned for fast and safe switching of large inductive currents without excessive absorption of energy in the interrupting chambers. Transient recovery voltage (TRV) appears on the circuit breaker contacts when interrupting a short circuit, immediately after extinguishing the electric arc. Circuit breakers can be used also for interruption of small inductive currents in the case of switching inductive loads (switching of unloaded transformers or high voltage shunt reactors).

In this paper a model of electric arc in SF₆ circuit breaker was developed in the EMTP-RV software. Model of electric arc was applied for the switching off 400 kV 100 MVar shunt reactor (interruption of small inductive currents) and for the interruption of short line fault in 400 kV network (interruption of high inductive currents). The influence of different circuit breaker models on the shunt reactor overvoltages due to interruption of small inductive currents was analyzed. Also, transient recovery voltage on circuit breaker was analyzed in case of interruption of short line fault.

Key words: electric arc model, transient recovery voltage, small inductive current interruption, electric arc instability

1. UVOD

Prigušnice se u visokonaponskim rasklopnim postrojenjima koriste za kompenzaciju jalove snage kapacitivnog karaktera. Sklapanje ovakvih prigušnica spada u normalne pogonske manipulacije koje se, zavisno od opterećenja i naponskih prilika koje vladaju u mreži (kapacitivna jalova snaga povećava se s kvadratom napona), često puta obavljaju i više puta na dan. S obzirom na tehničke karakteristike i namjenu prigušnica, njihova struja ima izrazito induktivni karakter. Budući da su struje visokonaponskih prigušnica znatno manje od nazivnih struja danas korištenih SF₆ prekidača, a pogotovo od očekivanih struja kratkog spoja, govori se o maloj induktivnoj struji. Kod malih struja medij za gašenje luka dovodi do brzog porasta otpora rezidualnog stupca i naglog prekida struje prije njenog prirodnog prolaza kroz nulu. Zbog energije pohranjene u induktivitetu prigušnice dolazi do elektromagnetskih prijelaznih pojava koje uzrokuju prenapone.

Prekidanje bliskog kratkog spoja izuzetno je težak režim rada za visokonaponske prekidače, posebno za moderne SF₆ prekidače, upravo zbog velike strmice PPN-a u početnom dijelu koju uzrokuje visokofrekvencijska oscilacija sa strane dalekovoda. U radu je analizirano prekidanje malih induktivnih struja pri isklupu VN prigušnice i PPN na prekidaču pri prekidanju struje bliskog kratkog spoja.

2. MODEL ELEKTRIČNOG LUKA

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 (*eng. 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 detaljno obuhvatiti sve fizikalne procese koji se zbivaju za vrijeme gorenja električnog luka [1], [2].

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.

Diferencijalna jednadžba riješena je u EMTP-RV-u primjenom trapeznog pravila numeričke integracije [3], [4]. P i T su funkcije vodljivosti luka g . Prema tome, vodljivost luka određena razdiobom temperature i veličinom 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 $P(g)$, $T(g)$:

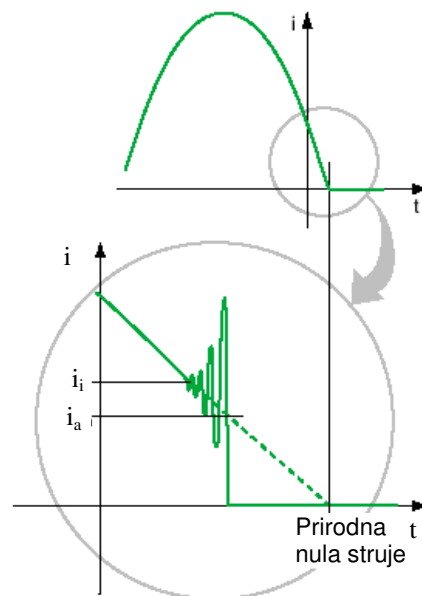
$$T(g) = T_0 \cdot g^\alpha = 1.5 \mu s \cdot g^{0.17} \quad (2)$$

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

U jednadžbama (2) i (3) T_0 , P_0 , 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. Model električnog luka sa parametrima dobivenim iz laboratorijskih mjerenja uspješno je primijenjen na jednostavnom testnom krugu [2].

3. PREKIDANJE MALIH INDUKTIVNIH STRUJA

Prekidanje struje izrazito induktivnog karaktera može dovesti do pojave prenapona uzrokovanih preranim prekidanjem struje. Za male induktivne struje od nekoliko ampera do nekoliko desetaka ampera hlađenje luka, kod prekidača dimenzioniranih za prekidanje struja kratkog spoja, znatno je veće u odnosu na energiju koju disipira luk. To dovodi do nestabilnosti luka i mogućeg prekidanja struje prije njenog prirodnog prolaska kroz nulu (slika 1).

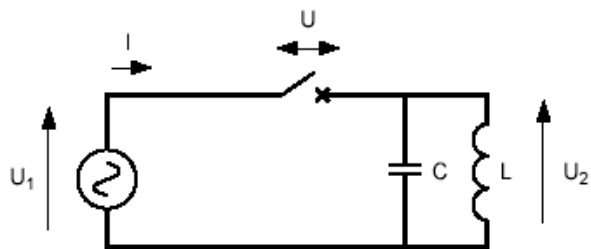


Slika 1. Visokofrekvencijske oscilacije pri prekidanju malih induktivnih struja; i - struja kroz prekidač, i_i - vrijednost struje koja dovodi do nestabilnosti luka, i_a - vrijednost odrezane struje

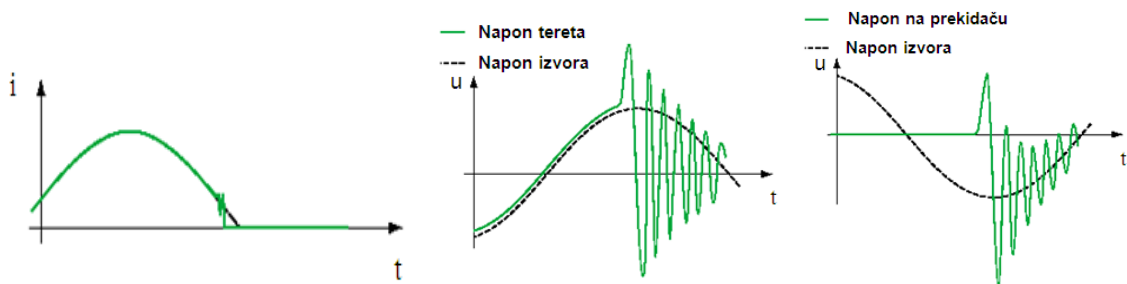
Za vrijeme visokofrekvencijskih oscilacija (oko 1 MHz) moguć je prekid struje prije njenog prirodnog prolaska kroz nulu kod frekvencije 50 Hz. Ta se pojava zove rezanje struje (*eng. current chopping*) i popraćena je pojavom prenapona. Značajna je činjenica da u praksi svi induktivni krugovi imaju i određeni maleni iznos kapaciteta, npr. paraziti kapaciteti između zavoja i jezgri transformatora. Iako se taj kapacitet zanemaruje u normalnom pogonu on igra važnu ulogu u procesu prekidanja struje. Poseban problem predstavlja prekidanje malih induktivnih struja. Prekidanje struje prije njenog prirodnog prolaska kroz nulu ima za posljedicu velike prenapone. Gašenjem luka prije nego što je struja postigla vrijednost nula ostaje u prigušnici akumulirana energija $\frac{1}{2}L \cdot i^2$, gdje je i struja koja je tekla neposredno prije gašenja luka. Akumulirana elektromagnetska energija u induktivitetu pretvara se u elektrostatsku energiju u kapacitetu i u toplinsku na otporu. Energija se troši u titrajnom krugu induktivitet-kapacitet pa mora biti zadovoljena jednadžba (4):

$$\frac{1}{2}L \cdot i^2 = \frac{1}{2}C \cdot U^2 \quad (4)$$

gdje je C kapacitet kruga, a U napon na kapacitetu. Budući da je kapacitet prigušnice malen napon na prigušnici mora postati visok pa zbog toga može doći do pojave visokih prenapona u slučaju isklapanja. Prirodne oscilacije LC kruga (slika 2) prigušuju se više ili manje ovisno o otporu prisutnom u krugu.



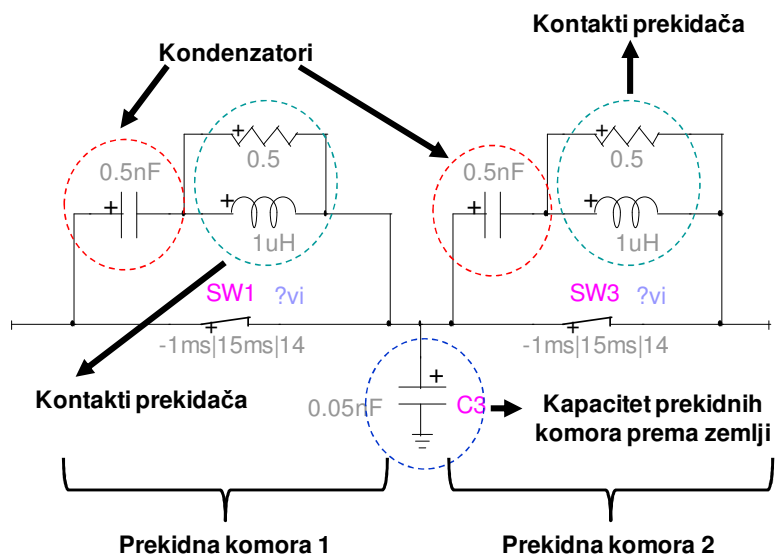
Slika 2. Shema kruga sa induktivnim teretom: U_1 - napon izvora, U_2 - napon tereta, U – napon na prekidaču, C – parazitni induktivitet, L – induktivitet trošila, I – struja koja se prekida



Slika 3. Valni oblici napona i struje pri prekidanju malih induktivnih struja

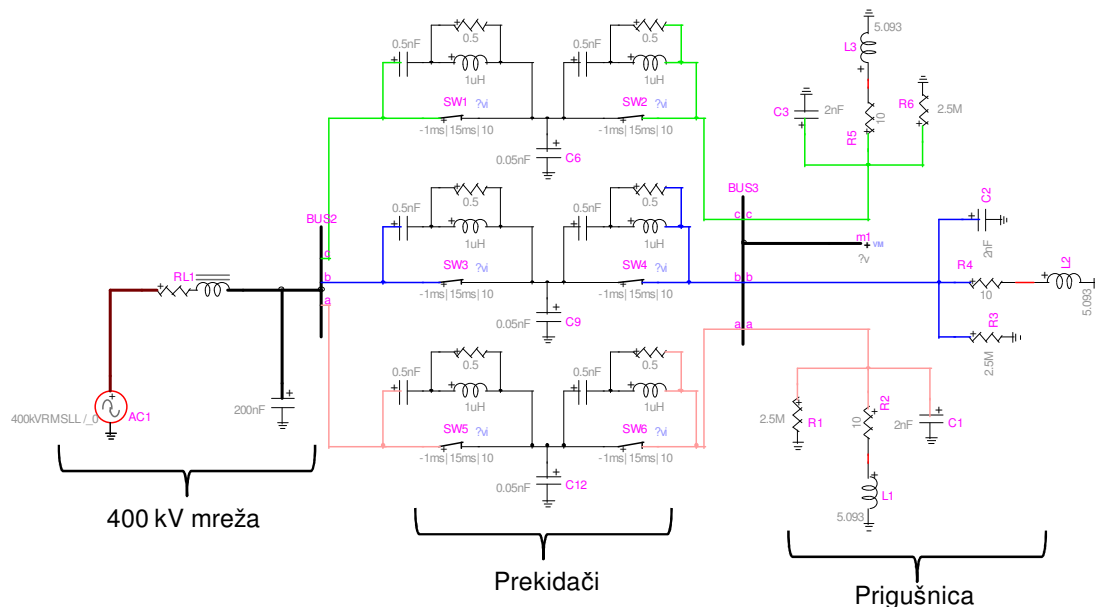
Kod sklapanja malih induktivnih struja u praksi se osim visokonaponskih prigušnica koje se koriste za kompenzaciju jalove snage da bi se izbjeglo povišenje napona na dugim, slabo opterećenim visokonaponskim dalekovodima, mogu spomenuti još i neopterećeni ili slabo opterećeni transformatori [5], [6].

Prekidanje malih induktivnih struja SF₆ prekidačima analizirano je na primjeru isklapanja 400 kV prigušnice snage 100 MVar. Prekidači su u ovim simulacijama modelirani kao idealne sklopke (slika 4) pri čemu je zadana struja rezanja 10 A.

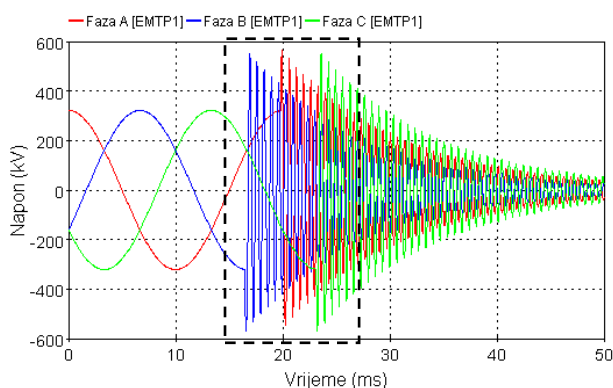


Slika 4. Modeliranje prekidača pomoću idealne sklopke

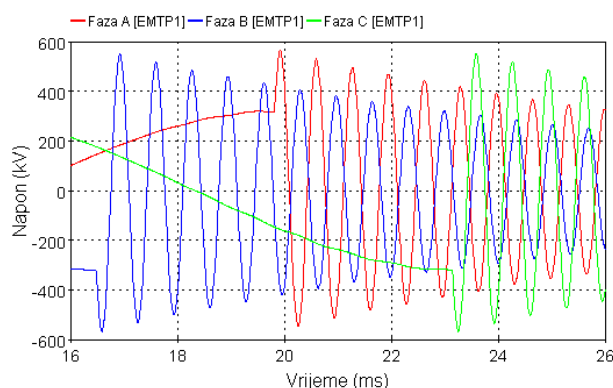
Trofazni model za proračune je prikazan na slici 5, a rezultati proračuna na slikama 6-9.



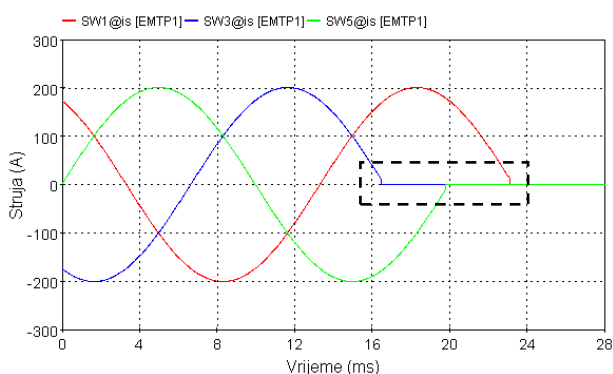
Slika 5. Trofazni model za proračun prenapona kod isklapanja VN prigušnice (prekidač modeliran kao idealna sklopka)



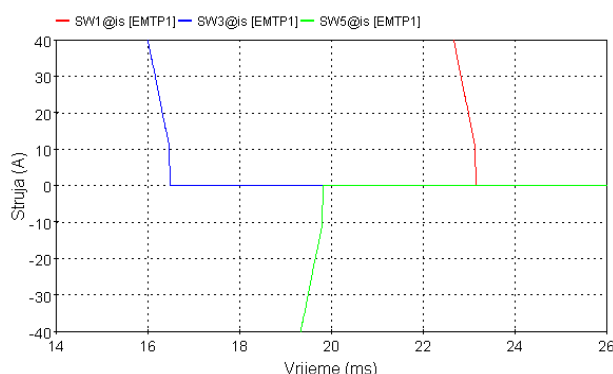
Slika 6. Prenaponi na VN prigušnici pri prekidanju malih induktivnih struja



Slika 7. Prenaponi na VN prigušnici pri prekidanju malih induktivnih struja (uvećano)
 $U_a=565$ kV, $U_b=-568$ kV, $U_c=-569$ kV

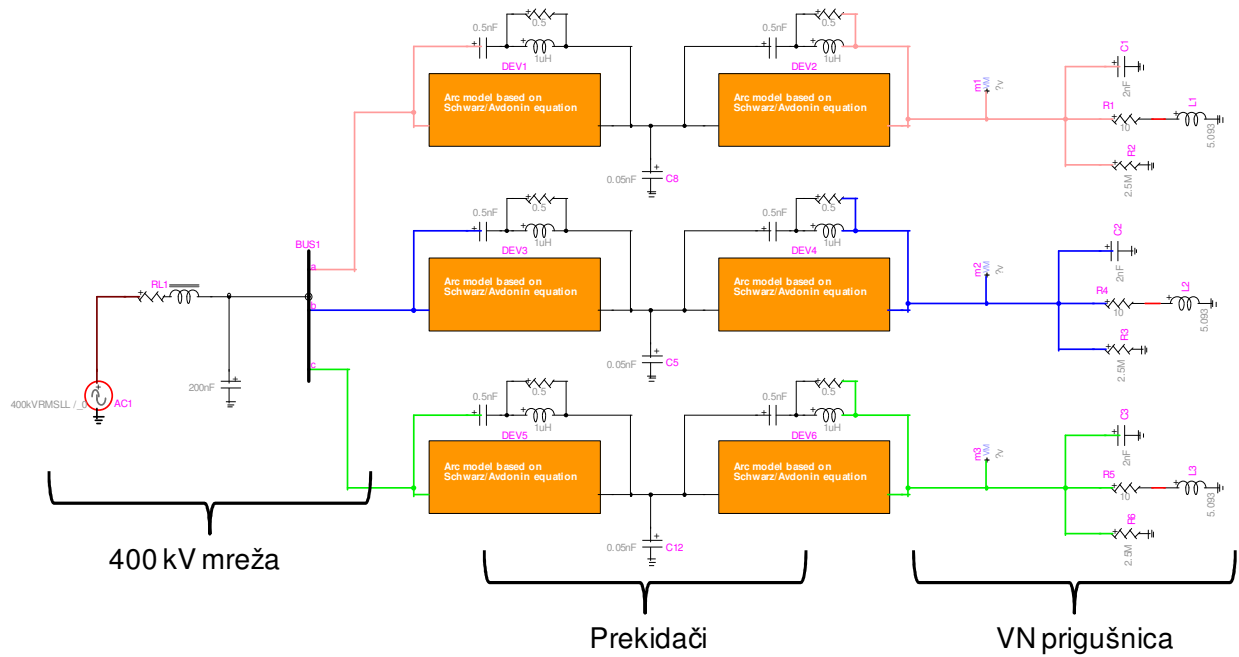


Slika 8. Struje kroz prekidač pri prekidanju malih induktivnih struja



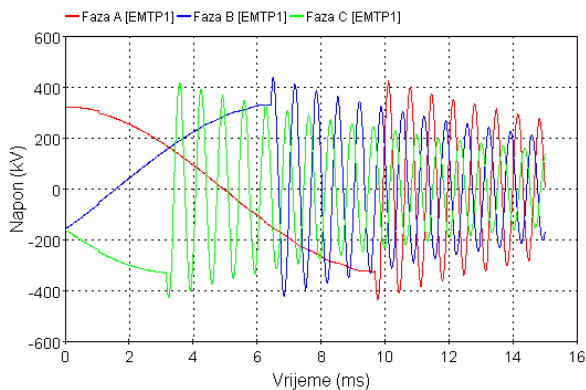
Slika 9. Struje kroz prekidač pri prekidanju malih induktivnih struja (uvećano) $I_a=10$ A

U sljedećim simulacijama prekidač je modeliran pomoću prethodno opisanog modela električnog luka. Trofazni model za proračun prenapona kod isklapanja VN prigušnice u kojemu je prekidač modeliran pomoću modela električnog luka prikazan je na slici 10.

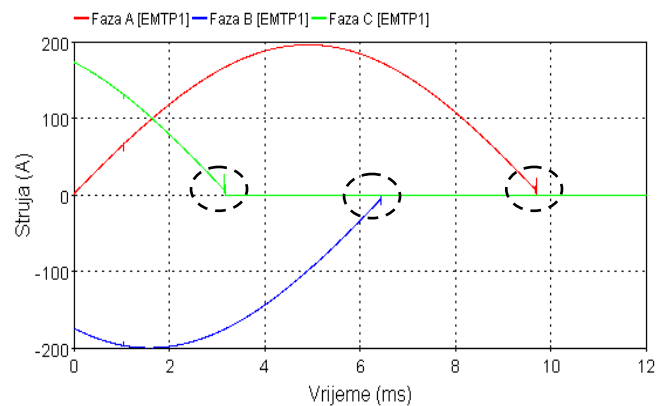


Slika 10. Trofazni model za proračun prenapona kod isklapanja VN prigušnice (prekidač modeliran pomoću modela električnog luka)

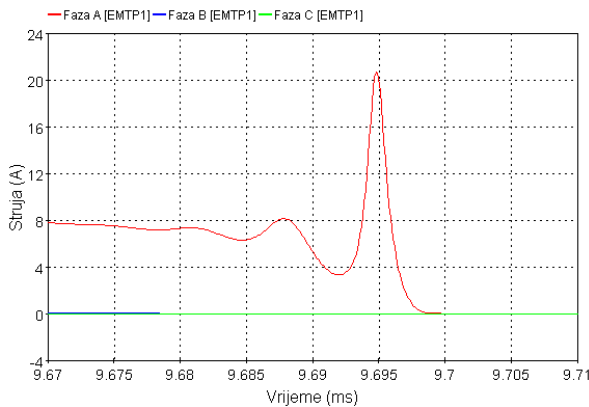
Rezultati proračuna su prikazani na slikama 11–18.



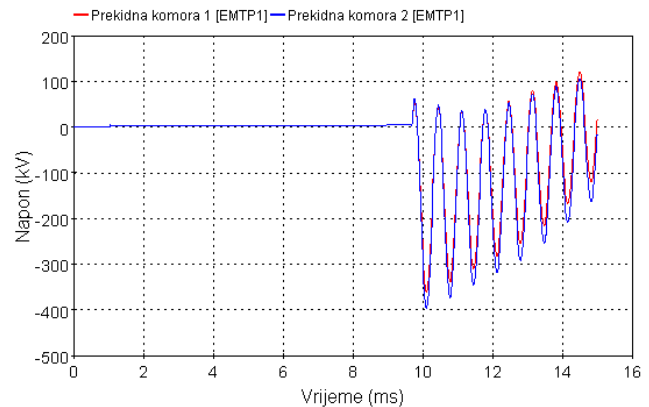
Slika 11. Prenaponi na VN prigušnici pri prekidanju malih induktivnih struja
 $U_a=436$ kV, $U_b=436$ kV, $U_c=-428$ kV



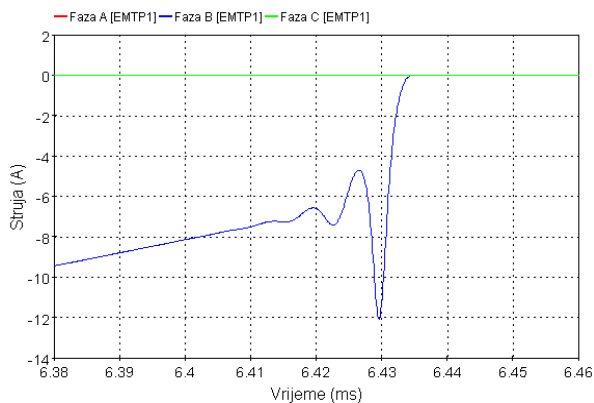
Slika 12. Struje kroz prekidač pri prekidanju malih induktivnih struja



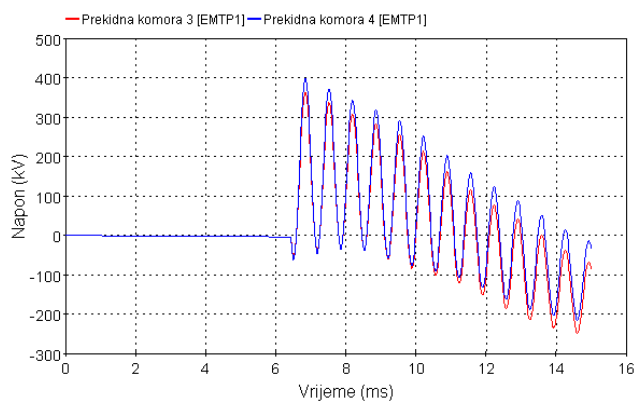
Slika 13. Struja pri prolasku kroz nulu u fazi A



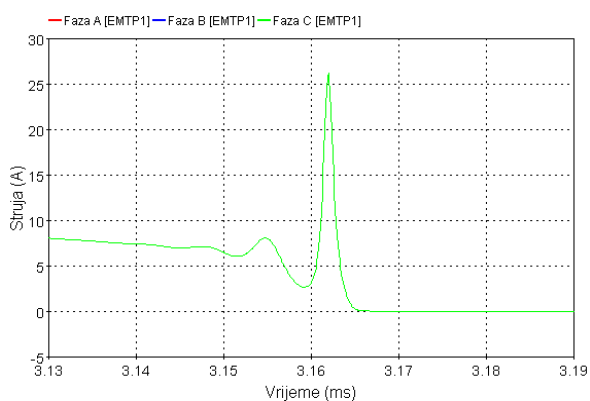
Slika 14. Naponi u prekidnim komorama 1 i 2 (faza A)



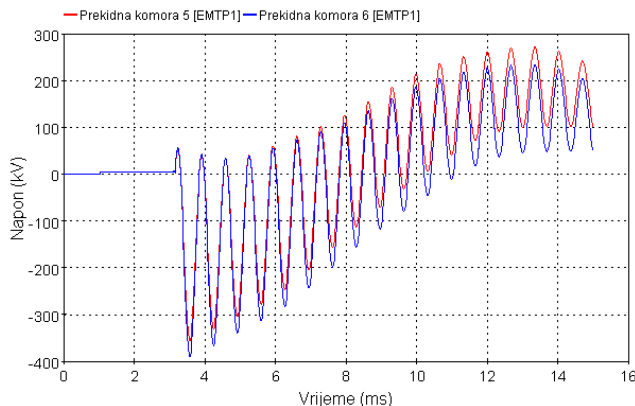
Slika 15. Struja pri prolasku kroz nulu u fazi B



Slika 16. Naponi u prekidnim komorama 3 i 4 (faza B)



Slika 17. Struja pri prolasku kroz nulu u fazi C



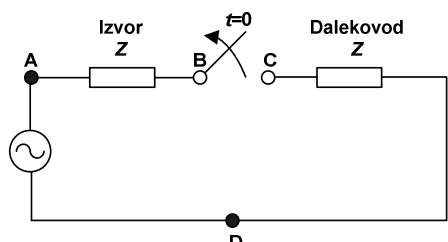
Slika 18. Naponi u prekidnim komorama 5 i 6 (faza C)

Izračunati prenaponi na prigušnici znatno su veći u proračunima u kojima se prekidač modelirao kao idealna sklopka. Iz provedenih simulacija može se zaključiti da je za točan proračun prenapona na prigušnici potrebno u simulacijama prekidač modelirati diferencijalnom jednačbom električnog luka. Na taj način uzima se u obzir nestabilnost električnog luka i pojava visokofrekvencijske oscilacije struje pri prolasku kroz nulu.

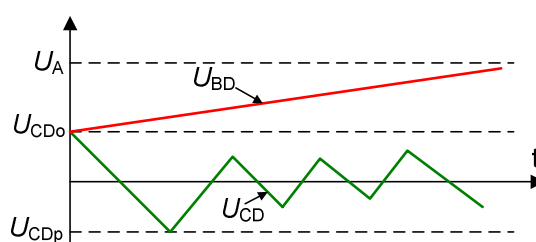
4. PREKIDANJE STRUJE BLISKOG KRATKOG SPOJA

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 [7].

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

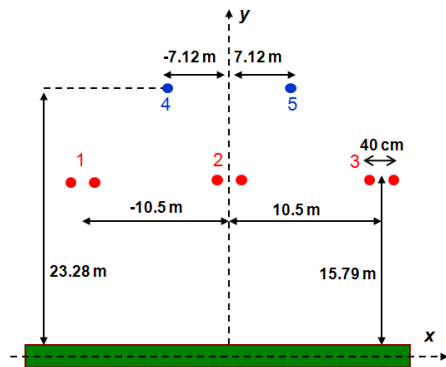


Slika 19. PPN pri bliskom kratkom spoju (U_{BD} – napon sa strane izvora, U_{CD} – napon sa strane dalekovoda)

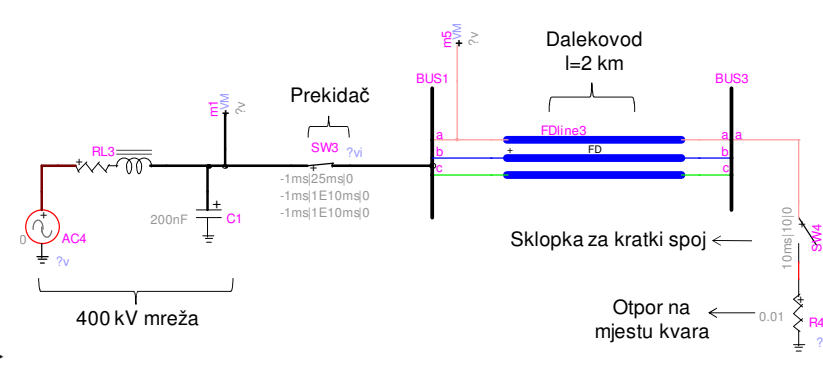


U praksi je pilasti oblik PPN-a u određenoj mjeri deformiran zbog postojanja dodatnih kapaciteta na stezaljkama prekidača (npr. kapaciteta naponskih i strujnih transformatora i sl.), a isto tako je i vrh oscilacija lagano zaobljen. Napon sa strane dalekovoda ima veliki utjecaj na strminu PPN-a na prekidaču,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

Na slikama 20 i 21 prikazane su dimenzije modeliranog 400 kV dalekovoda i trofazni model za proračun PPN-a u kojemu je prekidač modeliran kao idealna sklopka. Dalekovod je modeliran pomoću JMarti frekvencijski ovisnog modela.

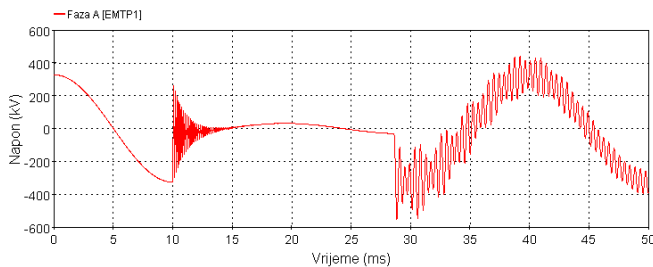


Slika 20. Dimenzije 400 kV dalekovoda

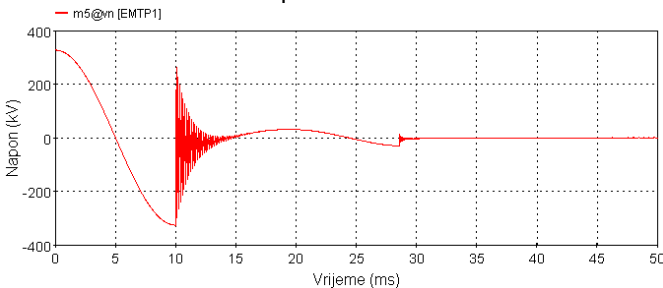


Slika 21. Trofazni model za proračun PPN-a (prekidač modeliran kao idealna sklopka)

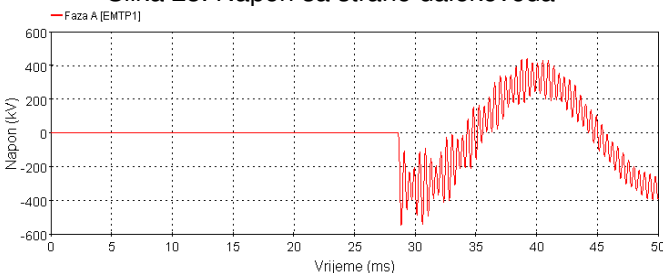
Analizirano je prekidanje struje bliskog kratkog spoja u fazi A na udaljenosti 2 km od prekidača. Rezultati simulacija prikazani su na slikama 22-26. Početni prijelazni povratni napon (PPPN) na prekidaču iznosi 3.43 kV/μs.



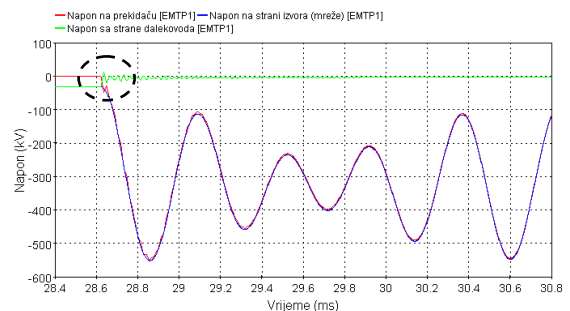
Slika 22. Napon sa strane mreže



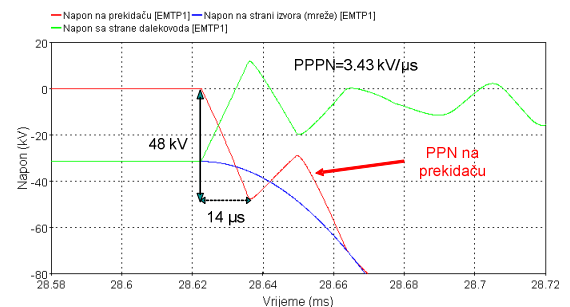
Slika 23. Napon sa strane dalekovoda



Slika 24. PPN na prekidaču

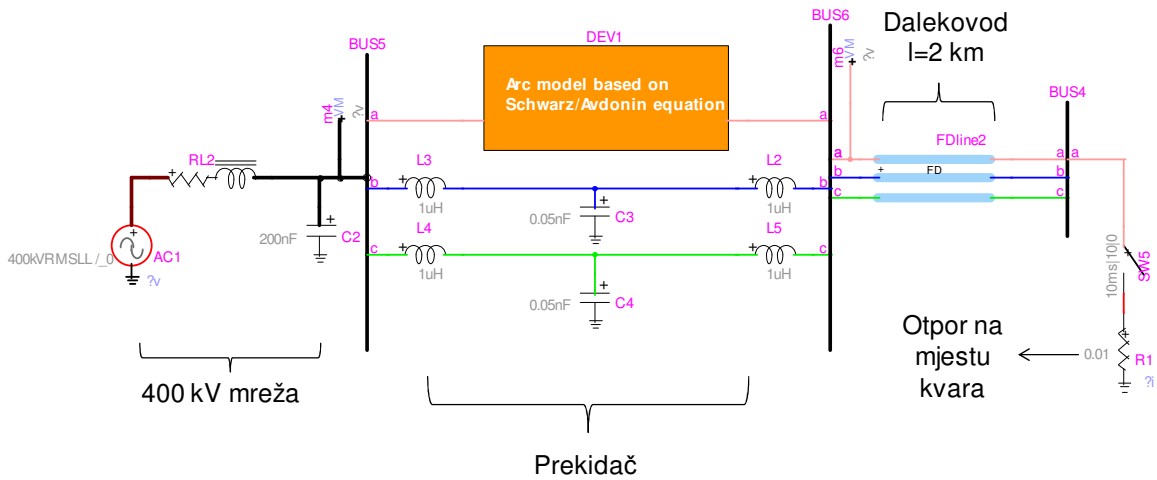


Slika 25. PPN na prekidaču nakon prekidanja bliskog kratkog spoja

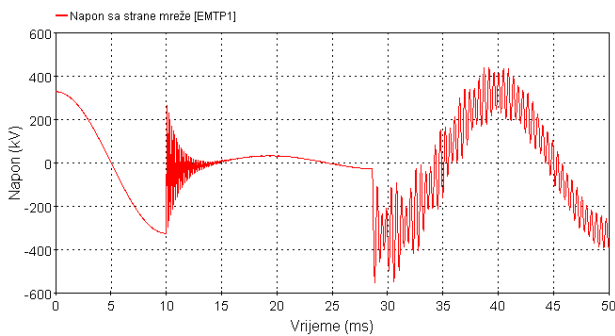


Slika 26. PPPN na prekidaču nakon prekidanja bliskog kratkog spoja (uvećano)

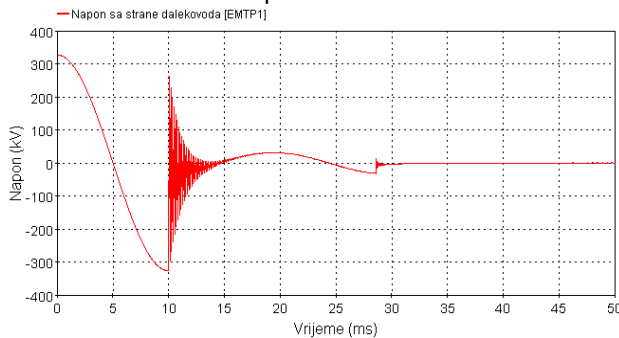
Na slici 27 prikazan je trofazni model za proračun PPN-a u kojemu je prekidač modeliran pomoću modela električnog luka. Rezultati simulacija prikazani su na slikama 28-32. PPPN na prekidaču iznosi $3.22 \text{ kV}/\mu\text{s}$.



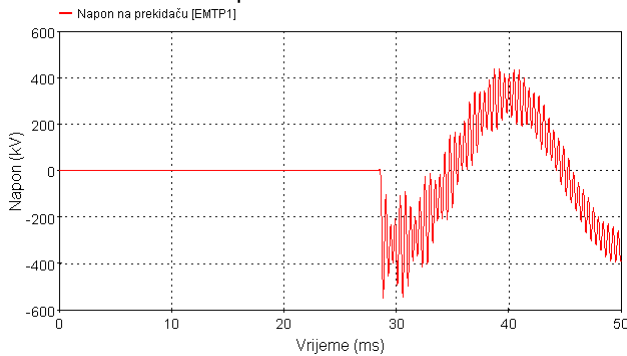
Slika 27. Trofazni model za proračun PPN-a (prekidač modeliran pomoću modela električnog luka)



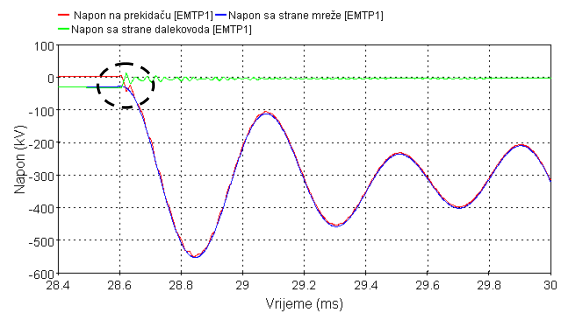
Slika 28. Napon sa strane mreže



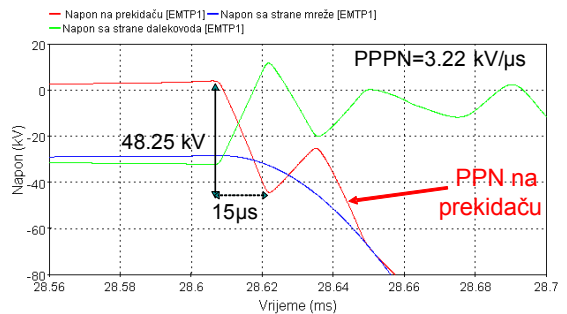
Slika 29. Napon sa strane dalekovoda



Slika 30. PPN na prekidaču



Slika 31. PPN na prekidaču nakon prekidanja bliskog kratkog spoja



Slika 32. PPN na prekidaču nakon prekidanja bliskog kratkog spoja (uvećano)

5. ZAKLJUČAK

U radu je razvijen model električnog luka u SF₆ prekidaču u programu za proračun elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP-RV. Model električnog luka primijenjen je pri isklapanju 400 kV prigušnice snage 100 MVar (isklapanje malih induktivnih struja) te pri prekidanju bliskog kratkog spoja u 400 kV mreži (isklapanje velikih induktivnih struja).

Analiziran je utjecaj različitih modela prekidača na iznose prenapona na prigušnici pri prekidanju malih induktivnih struja i na iznos prijelaznog povratnog napona na prekidaču pri prekidanju struje bliskog kratkog spoja. Iz provedenih simulacija može se zaključiti da je za točan proračun prenapona na prigušnici i prijelaznog povratnog napona na prekidaču pri prekidanju bliskog kratkog spoja potrebno u simulacijama prekidač modelirati diferencijalnom jednačinom električnog luka.

Točnost proračuna ovisi o točnosti parametara električnog luka i načinu modeliranja mreže u blizini prekidača [8]. Parametri električnog luka određeni su iz laboratorijskih mjerenja, a model električnog luka je uspješno testiran na jednostavnom krugu. U slučaju kada se prekidač modelira pomoću modela električnog luka, manji su iznosi prenapona na VN prigušnici i manji je početni prijelazni povratni napon na prekidaču u odnosu na simulacije u kojima je prekidač modeliran kao idealna sklopka.

6. LITERATURA

- [1] CIGRE, Working Group 13.01 of the Study Committee 13, "State of the Art of Circuit-Breaker Modelling", December 1998.
- [2] Filipović-Grčić, Božidar; Uglešić, Ivo; Đikić, Branimir, "Prijelazni povratni napon na 400 kV SF₆ prekidaču pri prekidanju bliskog kratkog spoja", 9. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, Hrvatska, 8.-12.11.2009.
- [3] J. Mahseredjian, S. Denetière, L. Dubé, B. Khodabakhchian and L. Gérin-Lajoie: "On a new approach for the simulation of transients in power systems". Electric Power Systems Research, Vol. 77, Issue 11, September 2007, pp. 1514-1520.
- [4] J. Mahseredjian, C. Dewhurst, "Using EMTP Tutorials and Reference", Hydro-Québec/IREQ, 2007.
- [5] H. Požar, "Visokonaponska rasklopna postrojenja", Zagreb, 1990., pp. 280 – 318.
- [6] S. Theoleyre, "HV breaking techniques", Cahier technique no. 193, technical publication, Lyon, 1999.; <http://www.schneider-electric.com>.
- [7] R. W. Alexander, D. Dufournet, "Transient recovery voltages (TRVs) for high-voltage circuit breakers", IEEE Tutorial, October 16th 2008, Calgary, Canada.
- [8] IEEE PES Task Force on Data for Modeling System Transients of IEEE PES Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Simulation (General Systems Subcommittee); J. A. Martinez, J. Mahseredjian, and B. Khodabakhchian, "Parameter Determination for Modeling System Transients - Part VI: Circuit Breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, 2005.