

Božidar Filipović-Grčić
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr
Ivo Uglešić
ivo.uglesic@fer.hr
Ivica Pavić
ivica.pavic@fer.hr
Frano Tomašević
frano.tomasevic@fer.hr
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva

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

Alan Župan
alan.zupan@hops.hr
Hrvatski operator prijenosnog
sustava, d.o.o.

SMANJENJE RAZINA SKLOPNIH PRIJELAZNIH ELEKTROMAGNETSKIH POJAVA U 400 kV MREŽI PRIMJENOM TEHNIKE KONTROLIRANOG SKLAPANJA

SAŽETAK

U radu je analizirana problematika smanjenja razina sklopnih prijelaznih elektromagnetskih pojava u 400 kV mreži primjenom kontroliranog sklapanja u TS 400/110 kV Tumbri. Provedeni su proračuni uklopa planiranog 400 kV dalekovoda Tumbri-Ernestinovo duljine 231 km u praznom hodu i automatskog ponovnog uklopa u programu EMTP-RV. Rezultati proračuna pokazuju da kontrolirano sklapanje znatno smanjuje razinu sklopnih prenapona, uklopne struje i energetske opterećenje odvodnika prenapona.

Ključne riječi: Kontrolirano sklapanje, sklopni prenaponi, 400 kV prijenosna mreža, visokonaponski prekidači

APPLICATION OF CONTROLLED SWITCHING TO REDUCE SWITCHING OVERVOLTAGES IN 400 kV NETWORK

SUMMARY

This paper deals with the application of controlled switching technique in substation 400/110 kV Tumbri for limitation of switching overvoltages (SOVs) and transient currents in 400 kV network. Switching of planned 400 kV unloaded transmission line Tumbri-Ernestinovo 231 km long and line reclosing was analysed by using EMTP-RV software. Simulation results show that controlled switching significantly reduces SOVs, current transients and energy stress of station surge arresters.

Key words: Controlled switching, switching overvoltages, 400 kV transmission network, high-voltage circuit breaker

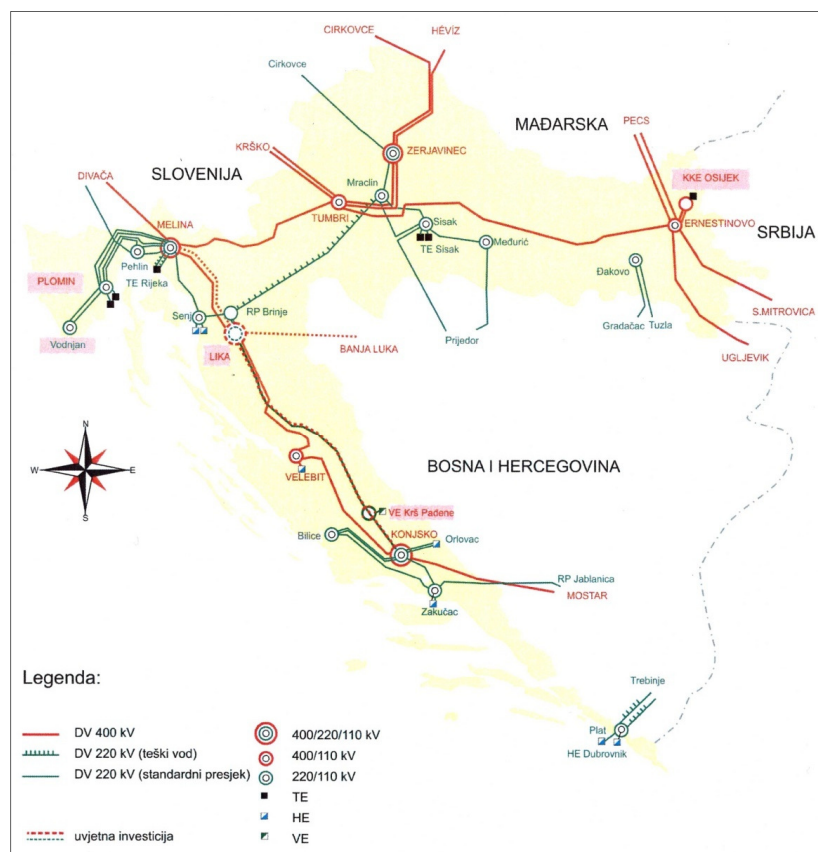
1. UVOD

Primjena kontroliranog ili sinkronog sklapanja visokonaponskih prekidača jedna je od suvremenijih preventivnih mjera u visokonaponskoj tehnici za sprječavanje neželjenih razina prijelaznih elektromagnetskih pojava sklopnog podrijetla [1-2]. Ista se u nekim svjetskim elektroprivredama primjenjuje već dulje vrijeme, naročito pri sklapanju specifičnih vrsta opterećenja kao što su tereti s malom induktivnom strujom (sklapanje kompenzacijskih prigušnica [3-4] i većih energetske transformatora), s ciljem smanjenja ili eliminacije rizika od pojave neželjenih struja uklapanja te prenapona u slučajevima pojave ponovnog paljenja luka u visokonaponskom prekidaču. Kontrolirano sklapanje primjenjuje se pri sklapanju karakterističnih kapacitivnih opterećenja kao što su slabo opterećeni ili neopterećeni nadzemni vodovi, kondenzatorske baterije ili kabelski vodovi viših naponskih razina [5]. Cilj je smanjenje sklopnih prenapona te minimiziranje rizika od pojave ponovnog preskoka u prekidaču, a posljedično sprječavanje potencijalnog havarijskog stanja u mreži [6].

Također, sve je češća primjena ove tehnike pri kontroliranom isklapanju struja kratkog spoja, odnosno pri automatskom ponovnom uklopu (APU-u) visokonaponskih prijenosnih vodova, u cilju kontroliranog vremenskog trajanja električnog luka u sklopnom uređaju te smanjenja njegova strujnog, termičkog i naponskog naprezanja. Na ovaj način poboljšavaju se prekidne performanse prekidača, a samim time povećava se i životni vijek opreme. Smanjenje i ograničenje razine sklopnih prenapona od posebnog je značaja za koordinaciju izolacije i mogućnost smanjenja izolacijske razine pri izgradnji novih ili pak rekonstrukciji postojećih prijenosnih vodova primjenom metoda kompaktiranja [7]. U radu su analizirane mogućnosti smanjenja razina i utjecaja sklopnih prijelaznih elektromagnetskih pojava u 400 kV mreži primjenom kontroliranog sklapanja.

2. OPIS TOPOLOŠKOG STANJA MREŽE 2025.g.

Analize sklopnih prenapona provedene su za planirano stanje prijenosne mreže 2025.g. (slika 1). Proračuni sklopnih prenapona provedeni su za slučaj sklapanja budućeg najduljeg 400 kV dalekovoda (DV) Tumbri-Ernestinovo (231 km) koji na krajevima ima ugrađene kapacitivne mjerne transformatore. Razmatrano je najnepovoljnije stanje slabog opterećenja vodova pri čemu naponi u 400 kV mreži dosežu maksimalni pogonski napon 420 kV.



Slika 1. Konfiguracija 400 kV i 220 kV mreže krajem 2025. godine

U proračunima su mrežni ekvivalenti modelirani naponskim izvorima i impedancijama kratkog spoja, koje su određene iz struja jednopolnog i trolnog kratkog spoja na 400 kV razini pri potpunom uklopnom stanju mreže. Proveden je proračun kratkog spoja prema stanju prijenosne mreže u 2025 g. TS Tumbri je u ovom uklopnom stanju mreže povezana s TS Žerjavinec preko 2x400 kV DV-a i s TS Ernestinovo preko 400 kV DV-a. U proračunima je uzet u obzir DV 400 kV Žerjavinec – Cirkovce – Heviz te neki 110 kV DV-i u zagrebačkoj mreži (prema 10-g planovima za 2025 g.). Proračuni su provedeni s TE Plomin-C i TE Osijek, te je pretpostavljeno da su u TS Tumbri 400/110 kV i TS Mraclin 220/110 kV u pogonu samo po dva transformatora. Proračunom su dobiveni sljedeći iznosi struja kratkog spoja u TS Tumbri:

- Tumbri 400 kV: $I_{k3}=24,7$ kA, $I_{k1}=23,9$ kA;
- Tumbri 110 kV: $I_{k3}=34,7$ kA, $I_{k1}=37,5$ kA.

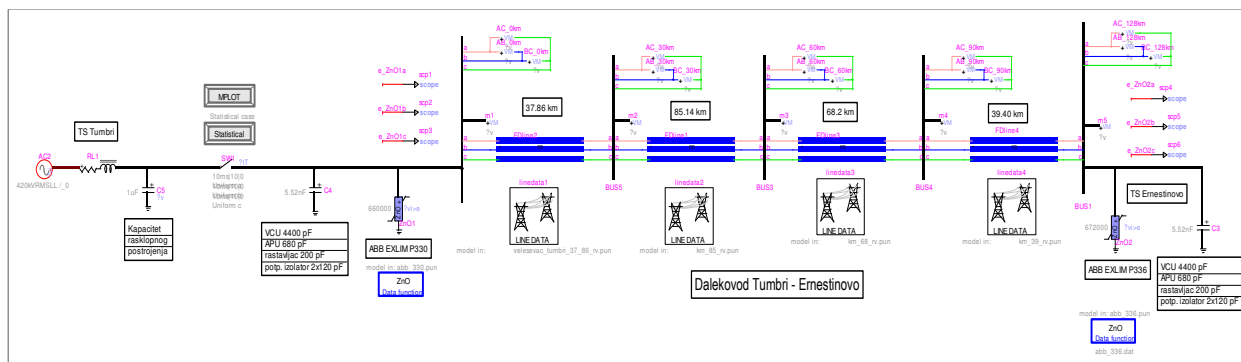
Udio u struji trolnog kratkog spoja iz TS Ernestinovo iznosi 1,49 kA, iz TS Žerjavinec 2x1,9 kA, iz TS Krško 2x3,77 kA, iz TS Melina 2,15 kA te iz 2 transformatora 400/110 kV 2x4,49 kA.

U nastavku su analizirane prijelazne pojave pri uklopu DV-a u praznom hodu iz TS Tumbri.

3. NEKONTROLIRANI UKLOP 400 kV DV-a TUMBRI-ERNESTINOVO U PRAZONOM HODU

3.1. Model u programu EMTP-RV

Slika 2 prikazuje model za proračun sklopnih prenapona na DV-u Tumbri – Ernestinovo u programu EMTP-RV.



Slika 2. Model za proračun sklopnih prenapona na 400 kV DV-u Tumbri – Ernestinovo

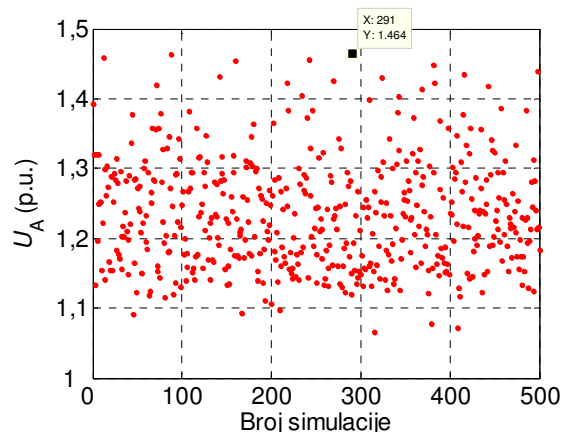
DV je modeliran frekvencijski ovisnim parametrima u EMTP-RV-u, a u obzir su uzeta prepletna mjesta na trasi. Odvodnici prenapona modelirani su nelinearnom $U-I$ karakteristikom s obzirom na sklopne prenapone. Na početku DV-a u TS Tumbri ugrađeni su odvodnici prenapona s nazivnim naponom $U_r=330$ kV, a na kraju DV-a u TS Ernestinovo odvodnici prenapona s nazivnim naponom $U_r=336$ kV. DV se uklapa u praznom hodu iz TS Tumbri. Iznos prenapona ovisi o trenutku uklapanja polova prekidača, koji se mogu uklapati u bilo kojem trenutku periode izmjeničnog napona. Najviši prenaponi pojaviti će se ukoliko je uklapanje izvršeno u trenutku maksimuma izmjeničnog napona.

Neistovremenost uklopa polova prekidača ima veliki utjecaj na faktore prenapona i predstavlja nepoznanicu u proračunu. Budući da je vjerojatnost uklapanja svih polova prekidača jako blizu maksimuma napona mala, odabrana je analiza pojave prenapona statističkim sklapanjem kod kojeg se uklop događa u slučajno odabranim vremenima prema Monte Carlo metodi. Pri tome je odabrana uniformna raspodjela u kojoj je rasipanje vremena uklopa polova prekidača oko srednjeg vremena uklopa μ , koje je za sve polove prekidača jednako. Za sva tri pola prekidača zadano je srednje vrijeme uklopa $\mu=10$ ms (trenutak koji odgovara maksimumu napona u fazi A) i standardna devijacija $\sigma=2$ ms (ukupno rasipanje polova prekidača $\pm 3,5$ ms).

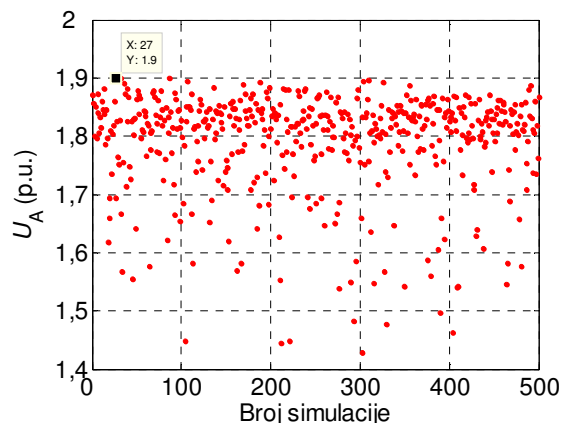
Visokonaponska oprema u 400 kV dalekovodnim poljima (mjerni transformatori, prekidači, rastavljači i sabirnički potporni izolatori) modelirana je koncentriranim kapacitetima prema zemlji, a mrežni ekvivalent na 400 kV razini u TS Tumbri modeliran je naponskim izvorom u seriji s impedancijama kratkog spoja (Theveninov ekvivalent).

3.2. Rezultati proračuna

Slike 3 i 4 prikazuju amplitude prenapona u fazi A na početku i kraju DV-a za 500 statističkih sklapanja prekidačem.

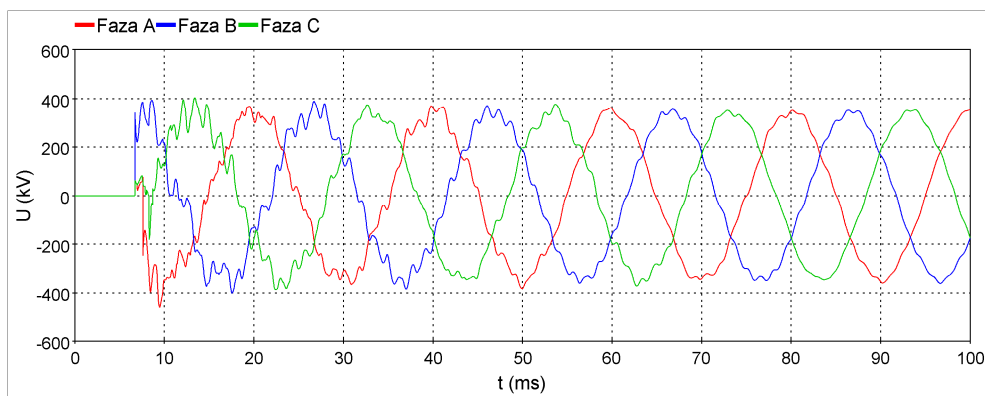


Slika 3. Amplitude prenapona u fazi A u TS Tumbri

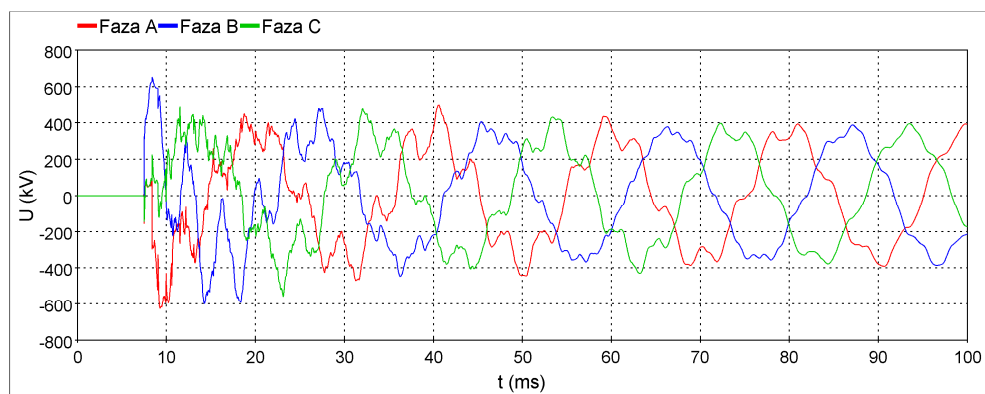


Slika 4. Amplitude prenapona u fazi A u TS Ernestinovo

Maksimalni iznos prenapona od 2,2 p.u. pojavljuje se u fazi B na udaljenosti 191,2 km od TS Tumbri. Valni oblici prenapona na početku i kraju DV-a u ovom slučaju prikazani su na slikama 5 i 6.

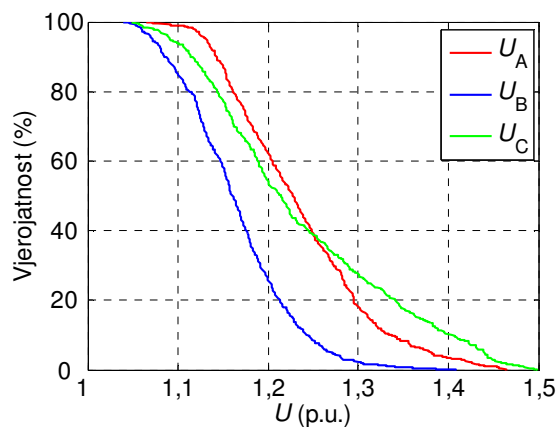


Slika 5. Prenaponi u TS Tumbri

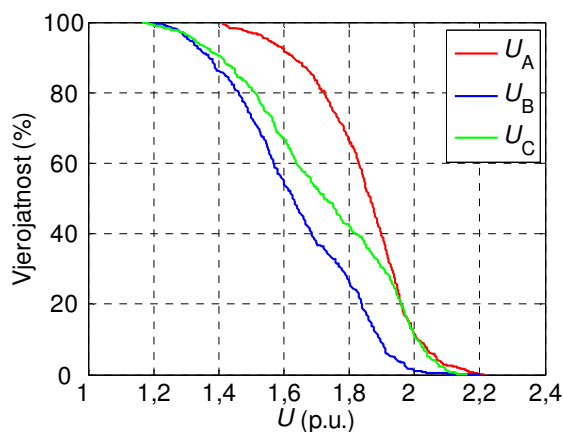


Slika 6. Prenaponi u TS Ernestinovo

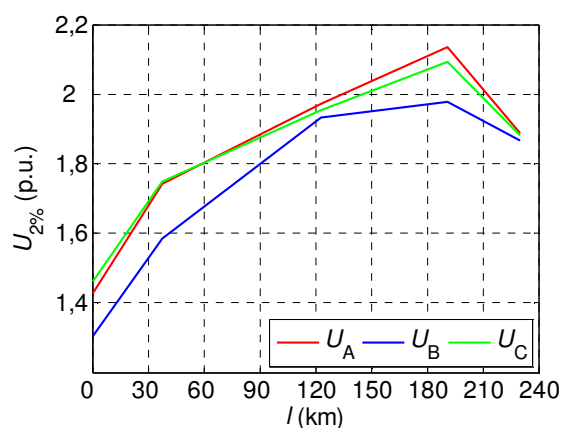
Slike 7 i 8 prikazuju kumulativne vjerojatnosti pojave faznih prenapona na početku i na kraju DV-a. Raspodjele $U_{2\%}$ faznih i međufaznih prenapona po duljini DV-a prikazani su na slikama 9 i 10. Energetsko opterećenje odvodnika prenapona u TS Ernestinovo za 500 statističkih sklapanja prekidačem prikazano je na slici 11.



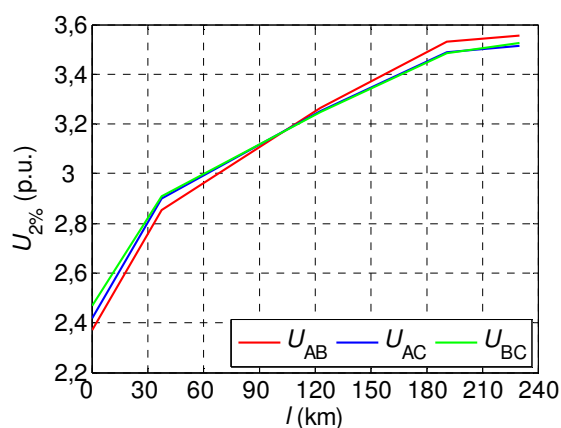
Slika 7. Kumulativna vjerojatnost pojave faznih prenapona u TS Tumbri



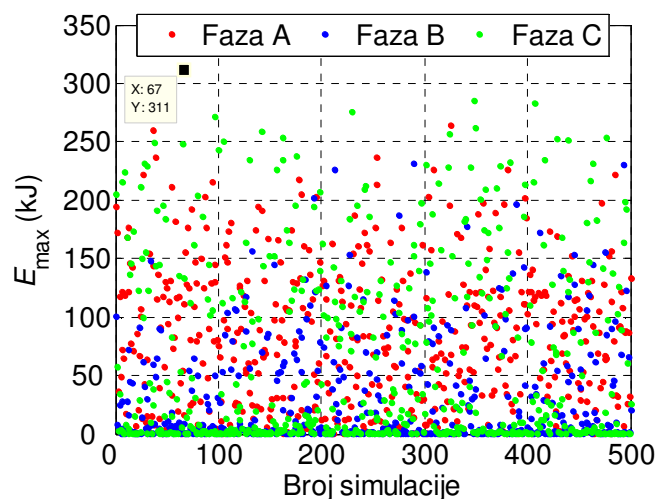
Slika 8. Kumulativna vjerojatnost pojave faznih prenapona u TS Ernestinovo



Slika 9. Raspodjela $U_{2\%}$ faznih prenapona po duljini DV-a

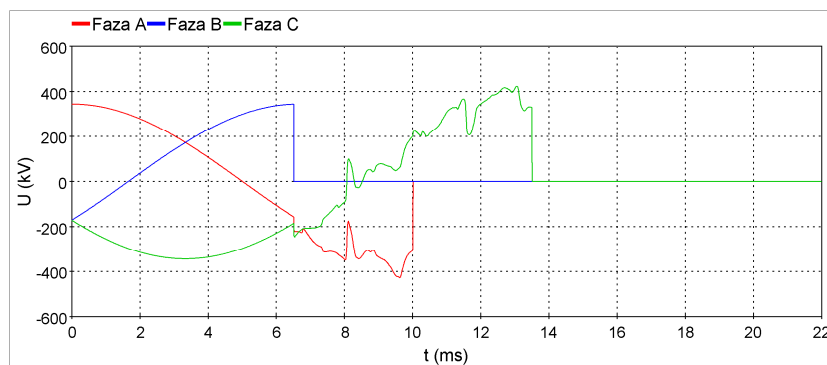


Slika 10. Raspodjela $U_{2\%}$ linijskih prenapona po duljini DV-a

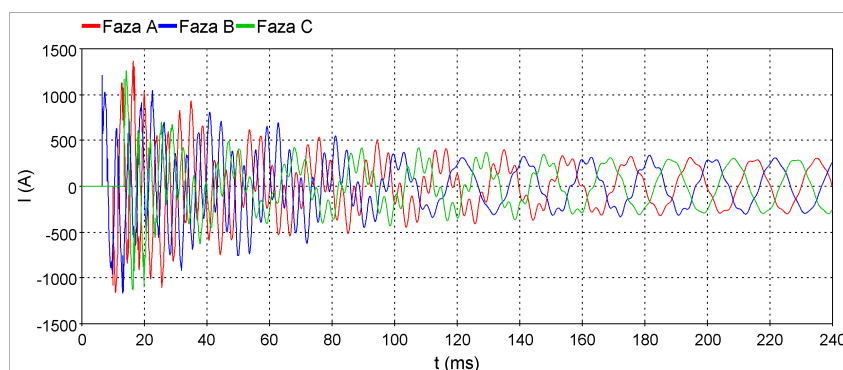


Slika 11. Energetsko opterećenje odvodnika prenapona u TS Ernestinovo

Amplitude uklopnih struja ovise o trenutku uklopa polova prekidača i duljini DV-a. Slika 12 prikazuje napone na prekidaču u TS Tumbri pri nekontroliranom uklopu DV-a u maksimumu napona mreže. Pri tome dolazi do pojave uklopnih struja čije amplitude dosežu 5 puta veće vrijednosti u odnosu na amplitudu stacionarne kapacitivne struje (slika 13).



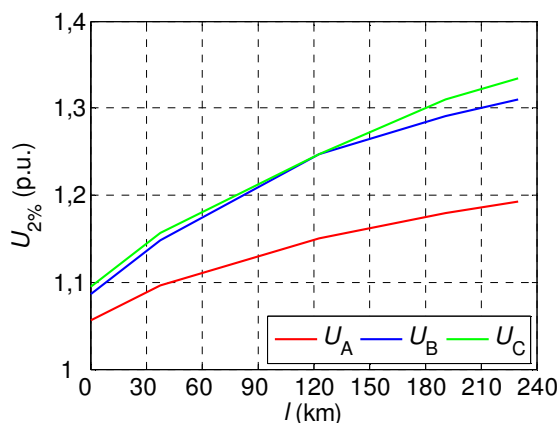
Slika 12. Napon na prekidaču u TS Tumbri ($t_A=10$ ms, $t_B=6,5$ ms, $t_C=13,5$ ms)



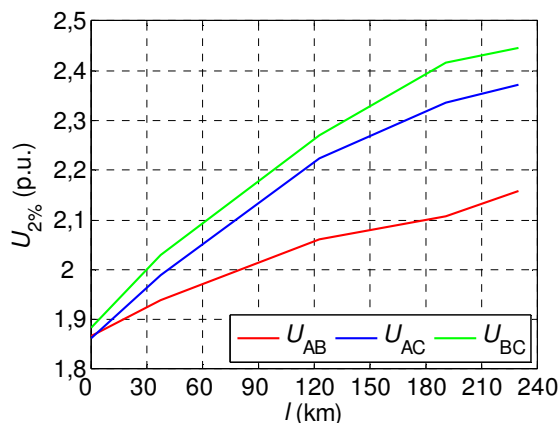
Slika 13. Uklopne struje u TS Tumbri ($I_{\max A}=1365,9$ A, $I_{\max B}=1213,8$ A, $I_{\max C}=1263,5$ A)

4. KONTROLIRANI UKLOP 400 kV DV-a TUMBRI-ERNESTINOVO U PRAZnom HODU

Optimalan trenutak ukopa DV-a u praznom hodu je pri prolasku napona kroz nulu. Prekidači sa kontroliranim sklapanjem imaju vrlo malo rasipanje polova, pa je u simulacijama pretpostavljeno da ono iznosi $\pm 0,5$ ms. Pri tome je odabrana uniformna raspodjela u kojoj je rasipanje vremena uklopa polova prekidača oko srednjeg vremena uklopa μ , koje je za sve polove prekidača različito i odgovara trenutku prolaska napona kroz nulu ($t_A=5$ ms, $t_B=11,7$ ms, $t_C=8,03$ ms). Standardna devijacija iznosi $\sigma=0,29$ ms, a simulirano je 500 slučajno odabranih trenutaka uklopa. Maksimalni iznos prenapona od 1,4 p.u. pojavljuje se u fazi C u TS Ernestinovo. Raspodjele $U_{2\%}$ faznih i linijskih sklopnih prenapona po duljini DV-a prikazane su na slikama 14 i 15.

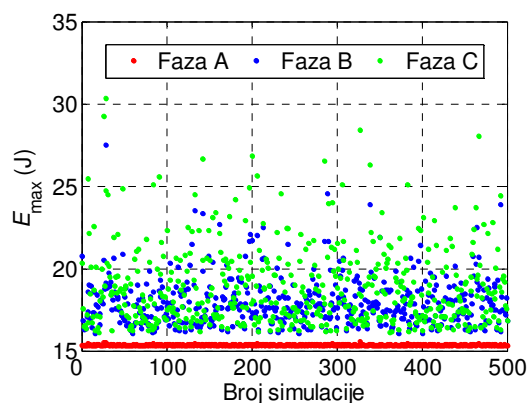


Slika 14. Raspodjela $U_{2\%}$ faznih prenapona po duljini DV-a



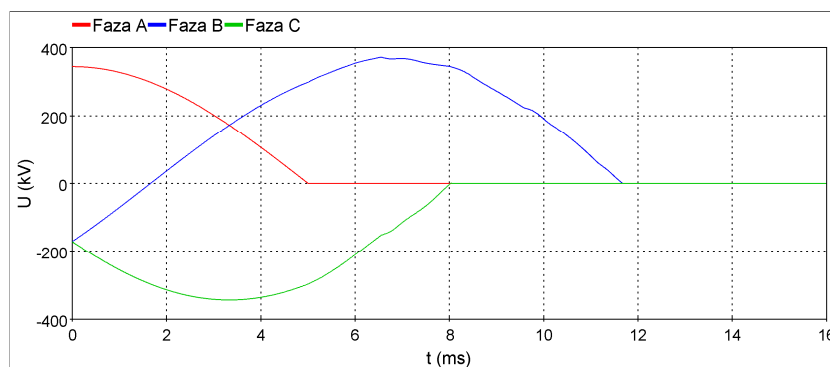
Slika 15. Raspodjela $U_{2\%}$ linijskih prenapona po duljini DV-a

Energetsko opterećenje odvodnika prenapona u TS Ernestinovo prikazano je na slici 16.

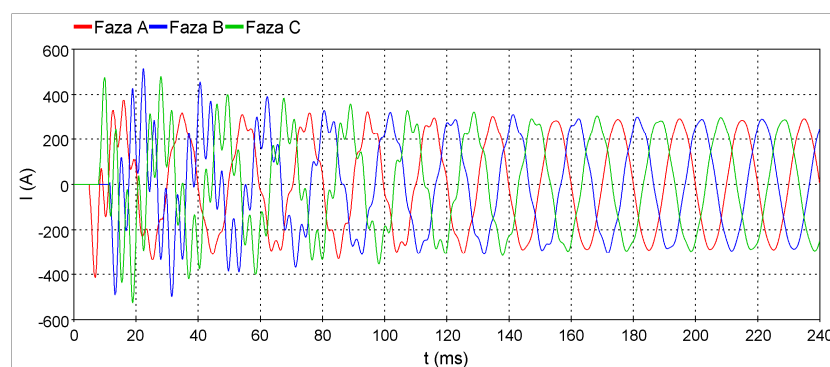


Slika 16. Energetsko opterećenje odvodnika prenapona u TS Ernestinovo

Slika 17 prikazuje napone na prekidaču u TS Tumbri pri kontroliranom uklopu DV-a pri prolasku napona kroz nulu. Kontrolirano sklapanje znatno smanjuje amplitude uklopnih struja (slika 18).



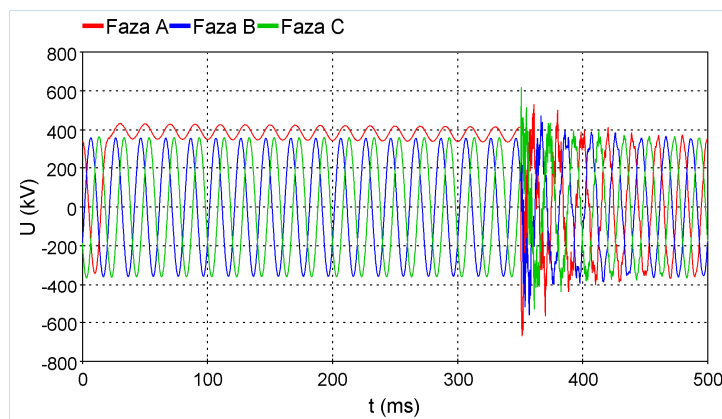
Slika 17. Napon na prekidaču u TS Tumbri ($t_A=5$ ms, $t_B=11,7$ ms, $t_C=8,04$ ms)



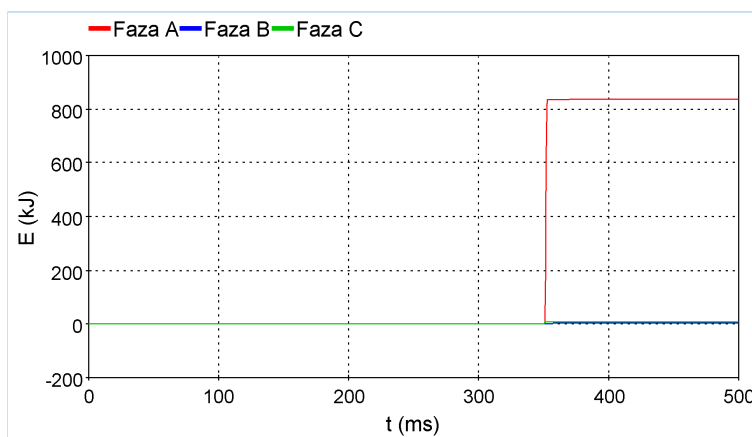
Slika 18. Uklopne struje u TS Tumbri ($I_{\max A}=-415,5$ A, $I_{\max B}=-513,7$ A, $I_{\max C}=-528,2$ A)

5. NEKONTROLIRANI APU 400 kV DV-a TUMBRI-ERNESTINOVO

U ovom poglavlju razmatrani su sklopni prenaponi pri jednopolnom APU-u DV-a Tumbri-Ernestinovo. Obzirom da se na krajevima DV-a nalaze kapacitivni mjerni transformatori, nakon isklopa prekidača ne može doći do trenutnog izbijanja naboja te na strani DV-a zaostaje naboj. Do ponovnog uklopa DV-a u slučaju bez sinkronog sklapanja može doći u bilo kojem trenutku mrežnog napona, što uzrokuje pojavu sklopnih prenapona. Iznos prenapona ovisi o trenutku uklapanja polova prekidača. Najviši prenaponi pojaviti će se ukoliko je uklapanje izvršeno u trenutku maksimuma izmjeničnog napona koji je po polaritetu suprotan polaritetu napona koji preostaje na DV-u. Slika 19 prikazuje napone u TS Ernestinovo, a slika 20 energetsko opterećenje odvodnika prenapona u TS Ernestinovo pri jednopolnom APU-u iz TS Tumbri.

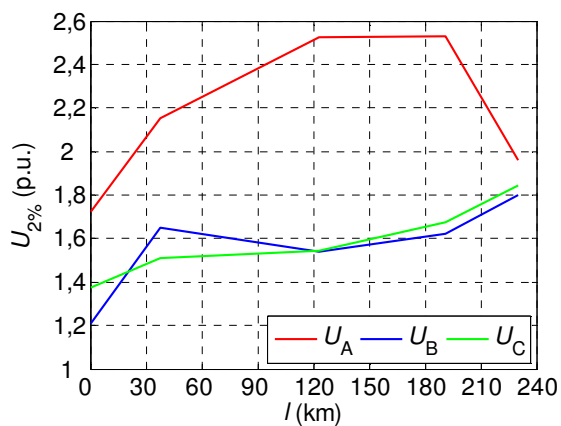


Slika 19. Naponi u TS Ernestinovo pri jednopolnom APU-u iz TS Tumbri

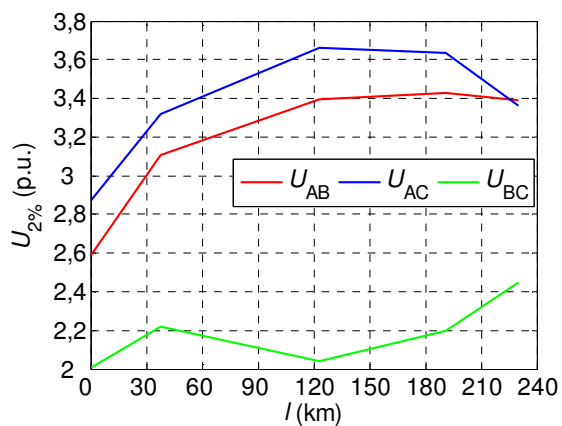


Slika 20. Energetsko opterećenje odvodnika prenapona u TS Ernestinovo

Odabrana je uniformna raspodjela u kojoj je rasipanje vremena uklopa pola prekidača u fazi A oko srednjeg vremena uklopa μ . Za pol prekidača u fazi A zadano je srednje vrijeme uklopa $\mu=350$ ms (trenutak koji odgovara negativnom maksimumu napona u fazi A) i standardna devijacija $\sigma=2$ ms (ukupno rasipanje polova prekidača $\pm 3,5$ ms). Raspodjele $U_{2\%}$ faznih i linijskih prenapona po duljini DV-a prikazane su na slikama 21 i 22.

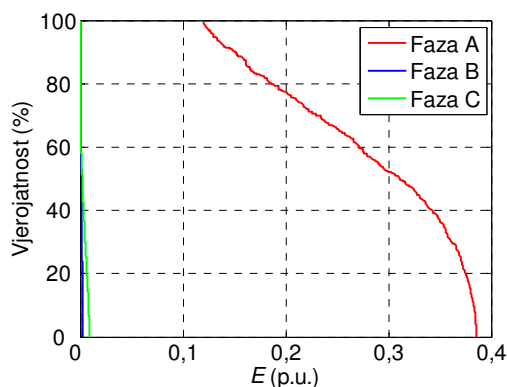


Slika 21. Raspodjela $U_{2\%}$ faznih prenapona po duljini DV-a



Slika 22. Raspodjela $U_{2\%}$ linijskih prenapona po duljini DV-a

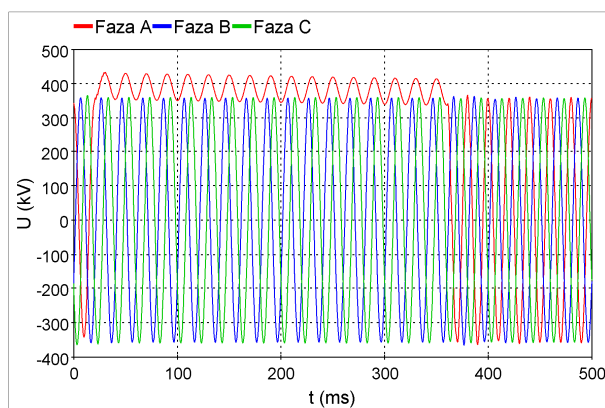
Kumulativna vjerojatnost energetskog opterećenja odvodnika u TS Ernestinovo prikazano je na slici 23.



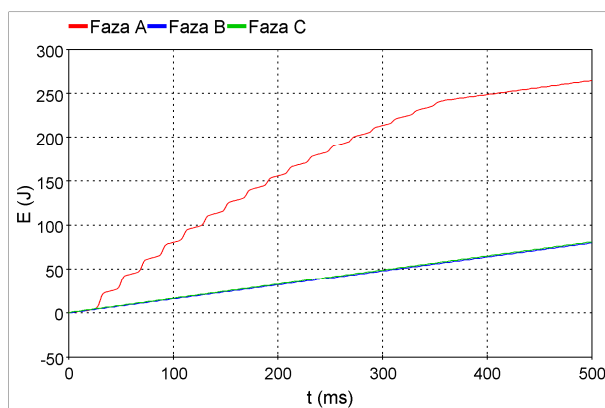
Slika 23. Kumulativna vjerojatnost energetskog opterećenja odvodnika u TS Ernestinovo

6. KONTROLIRANI APU 400 kV DV-a TUMBRI-ERNESTINOVO

Analizirano je kontrolirano sklapanje DV-a u optimalnom vremenskom trenutku koji odgovara maksimumu izmjeničnog napona koji je po polaritetu jednak polaritetu napona koji preostaje na DV-u. Slika 24 prikazuje fazne napone u TS Ernestinovo pri jednopolnom APU-u iz TS Tumbri. Nakon isklopa DV-a u trenutku $t=20$ ms, napon se u fazi A uklapa u vršnoj vrijednosti pozitivnog polariteta ($t=360$ ms). Slika 25 prikazuje energetsko opterećenje odvodnika prenapona u TS Ernestinovo za vrijeme APU-a.



Slika 24. Fazni naponi u TS Ernestinovo pri jednopolnom APU-u iz TS Tumbri
($U_A=1,27$ p.u., $U_B=1,07$ p.u., $U_C=1,07$ p.u.)



Slika 25. Energetsko opterećenje odvodnika prenapona u TS Ernestinovo

7. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana problematika smanjenja razina i utjecaja sklopnih prijelaznih elektromagnetskih pojava u 400 kV mreži primjenom kontroliranog sklapanja u TS 400/110 kV Tumbri. Analize su temeljene na rezultatima proračuna prijelaznih pojava na simulacijskom modelu 400 kV vodova i postrojenja u programu EMTP-RV. Proračuni sklopnih prenapona provedeni su za planirano stanje prijenosne mreže (2025.g.) u slučaju sklapanja budućeg 400 kV DV-a Tumbri-Ernestinovo duljine 231 km, koji na krajevima ima ugrađene kapacitivne mjerne transformatore.

Kontrolirani uklop DV-a u praznom hodu smanjuje $U_{2\%}$ fazne sklopne prenapone po duljini DV-a za iznose u rasponu 0,22 p.u. – 0,96 p.u. u odnosu na nekontrolirani uklop, a $U_{2\%}$ linijske sklopne prenapone za iznose u rasponu 0,5 p.u. – 1,4 p.u. Maksimalno energetske opterećenje odvodnika prenapona na kraju DV-a pri nekontroliranom uklopu iznosi 311 kJ, a pri kontroliranom sklapanju 31 J. Kontrolirano sklapanje znatno smanjuje amplitude uklopnih struja.

Kontrolirani APU smanjuje $U_{2\%}$ fazne sklopne prenapone na kraju DV-a za iznose u rasponu 0,67 p.u. – 1,27 p.u., a $U_{2\%}$ linijske sklopne prenapone za iznose u rasponu 0,63 p.u. – 1,24 p.u. Maksimalno energetske opterećenje odvodnika prenapona pri nekontroliranom APU-u iznosi 950 kJ, a pri kontroliranom APU-u 270 J.

Rezultati proračuna ukazuju na prednost tehnologije kontroliranog sklapanja, što rezultira sniženjem prenaponskih, strujnih i energetske naprezanja primarne opreme u visokonaponskim postrojenjima. Primjena takve tehnologije sklapanja podrazumijeva prvenstveno pouzdan prekidač u pogledu svojstava i preciznosti mehaničkih sklopova. U tom smislu, iako su na postojećim 400 kV prekidačima u većem dijelu mreže HOPS-a izvršene izvjesne rekonstrukcije i poboljšanja u mehaničkom i električnom dijelu prekidača kroz generalni remont, ocjena mogućnosti primjene kontroliranog sklapanja uz odgovarajući upravljačko-nadzorni uređaj iziskuje dodatna istraživanja i ispitivanja mehaničkih svojstava prekidača, prvenstveno kroz ocjenu preciznosti zahtijevanog i ciljanog trenutka sklapanja, dugotrajne pouzdanosti prekidača te određivanje vremena rasipanja polova. Stoga za buduća istraživanja predlaže se provedba takvih mjerenja pri sklapanju 400 kV DV-a Žerjavinec-Ernestinovo.

ZAHVALA

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom 9299 „Razvoj naprednih visokonaponskih sustava primjenom novih informacijskih i komunikacijskih tehnologija“.

8. LITERATURA

- [1] *Ruben D. Garzon*, „High Voltage Circuit Breakers, Design and Applications“.
- [2] *CIGRE, Working Group 13.01 of Study Committee 13: State of the Art of Circuit-Breaker Modelling, December 1998.*
- [3] *S. A. Morais*: „Considerations on the Specification of Circuit-Breakers Intended to Interrupt Small Inductive Currents“, *Electra* No. 147, April 1993.
- [4] *Z. Ma, C. A. Bliss, A. R. Penfold, A. F. W. Harris, S. B. Tennakoon*, „An Investigation of Transient Overvoltage Generation when Switching High Voltage Shunt Reactors by SF₆ Circuit Breaker“, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, April 1998.
- [5] *CIGRE WG 13.07*, „Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers“, Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers, 1st and 2nd Part, *Electra* No. 183, April 1999. and 185, August 1999.
- [6] *S. Bojić, I. Uglešić, B. Filipović-Grčić*, „Switching Transients in 400 kV Transmission Network due to Circuit Breaker Failure“, International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, Canada, 2013.
- [7] *B. Filipović-Grčić, I. Uglešić, I. Pavić*, „Application of Line Surge Arresters for Voltage Upgrading and Compacting of Overhead Transmission Lines“. // *Electric power systems research*. 140 (2016) ; pp. 830-835.