

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

Dalibor Filipović-Grčić
Končar – Institut za elektrotehniku
Zavod za transformatore
Visokonaponski laboratorij
dfilipovic@koncar-institut.hr

ENERGETSKO OPTEREĆENJE METAL-OKSIDNIH ODVODNIKA PRENAPONA PRI PRIVREMENIM PRENAPONIMA

SAŽETAK

U radu je prikazana metoda za odabir nazivnog napona metal-oksidnih odvodnika prenapona koja se temelji na proračunu energetske opterećenja. Pri odabiru nazivnog napona potrebno je poznavati ponašanje odvodnika pri privremenim prenaponima. U radu je razvijen model odvodnika za proračun energetske opterećenja pri privremenim prenaponima. Radna komponenta struje određena je iz $U-I$ karakteristike koja je izmjerena pri izmjeničnom naponu u laboratorijskim uvjetima. Razvijeni model primijenjen je za proračun energetske opterećenja odvodnika u transformatorskim stanicama koje su povezane kompaktnim dalekovodom. Primjenom predložene metode odabrani su odvodnici s niskim nazivnim naponom i boljim zaštitnim karakteristikama bez opasnosti od energetske preopterećenja pri privremenim prenaponima, a time je poboljšana prenaponska zaštita kompaktnog dalekovoda.

Ključne riječi: Privremeni prenaponi, odvodnik prenapona, energetske opterećenje, odabir nazivnog napona, laboratorijska mjerenja, kompaktni dalekovod

ENERGY STRESS OF METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS DUE TO TEMPORARY OVERVOLTAGES

SUMMARY

The paper presents a method for selecting the rated voltage of a metal-oxide surge arresters (MOSA) based on the calculation of energy stresses. The electrical behaviour of gapless MOSA under temporary overvoltages (TOV) is important when selecting the rated voltage of MOSA. The study of the appropriate MOSA model is conducted for the evaluation of energy stresses due to TOV. The resistive part of the leakage current was derived from the voltage-current ($U-I$) characteristic for AC voltage that was gained during the laboratory tests. The MOSA model was implemented in the study of energy stresses of station arresters that are installed at both terminals of a compact upgraded line. By implementing the proposed method MOSA with relatively low protection level can be selected without being overstressed by TOV and thus the overvoltage protection of compact line can be improved.

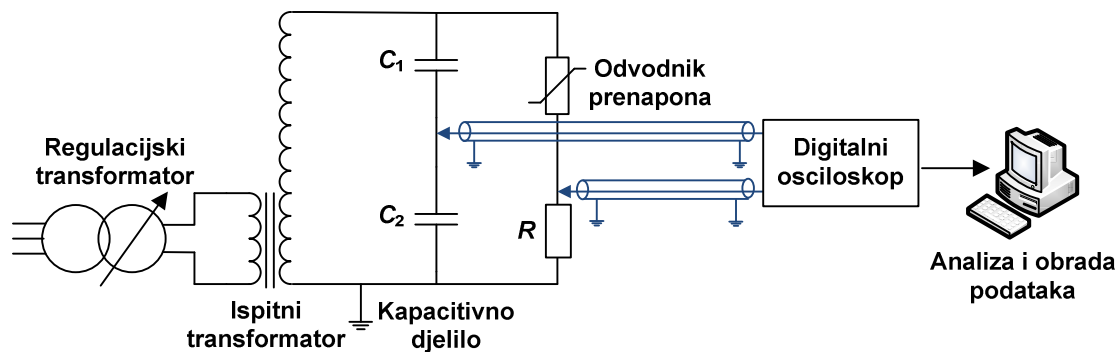
Key words: TOV, MOSA, energy stress, rated voltage selection, laboratory measurements, compact line

1. UVOD

Aktivni metal-oksidni dio odvodnika prenapona koji se koristi za prenaponsku zaštitu mora izdržati privremene, sklopne i atmosferske prenapone. Prema zahtjevima norme IEC 60099-5 nazivni napon odvodnika mora biti jednak ili veći od najvećeg ekvivalentnog privremenog prenapona koji se može pojaviti u mreži. Ograničenje previsoke razine sklopnih prenapona na kompaktnim dalekovodima u neuzemljenim ili djelomično uzemljenim visokonaponskim mrežama zahtijeva primjenu staničnih odvodnika prenapona s nižim preostalim naponom, tj. s nazivnim naponom nižim od najvećeg ekvivalentnog privremenog prenapona. U ovakvim slučajevima potrebno je provesti detaljan proračun energetskog opterećenja odvodnika pri privremenim prenaponima koji se mogu pojaviti u mreži. U ovom radu prikazan je način odabira nazivnog napona odvodnika prenapona s obzirom na energetsko opterećenje koje se javlja pri privremenim prenaponima. Problem previsokih sklopnih prenapona moguće je riješiti i upotrebom prekidača s uklopnim otporima ili uređajima za sinkrono sklapanje. Iskustvo pokazuje da se pojavljuje problem dugotrajne pouzdanosti mehanizma uklopnih otpora (naročito kod starijih prekidača) zbog komplicirane mehaničke konstrukcije, što ima nepovoljan utjecaj na ukupnu pouzdanost sustava [1], [2].

2. LABORATORIJSKA MJERENJA

U laboratorijskim uvjetima (slika 1) provedena su mjerenja na odvodniku prenapona s trajnim radnim naponom $U_c=36$ kV i nazivnim naponom $U_r=45$ kV, iz kojih je određena $U-I$ karakteristika.



Slika 1. Određivanje $U-I$ karakteristike odvodnika prenapona u laboratorijskim uvjetima

Valni oblik napona na odvodniku snimljen je kapacitivnim djelilom i digitalnim osciloskopom, a struja kroz odvodnik određena je iz pada napona na otporniku R i vrijednosti njegova otpora. Ukupna struja kroz odvodnik sastoji se od radne i kapacitivne komponente. U programu Matlab primijenjena je kompenzacijska metoda [3] za određivanje radne komponente struje. Napon na odvodniku prenapona sadrži više harmonike:

$$u = \sum_n U_n \sin(n\omega t + \Phi_n) \quad (1)$$

gdje je:

n – red harmonika ($n=1$ – osnovni harmonik),
 U_n – amplituda napona n -tog harmonika,
 Φ_n – fazni kut n -tog harmonika.

Kapacitivna struja i_c osim osnovnog harmonika i_{c1} sadrži i više harmonike:

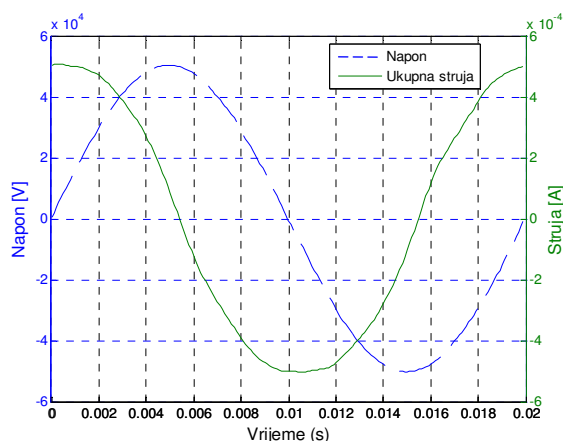
$$i_c = i_{c1} + \sum_n i_{cn} \quad (2)$$

Viši harmonici u kapacitivnoj struji i_{cn} potječu od viših harmonika napona. Radna komponenta struje i_r također se sastoji od osnovnog i viših harmonika:

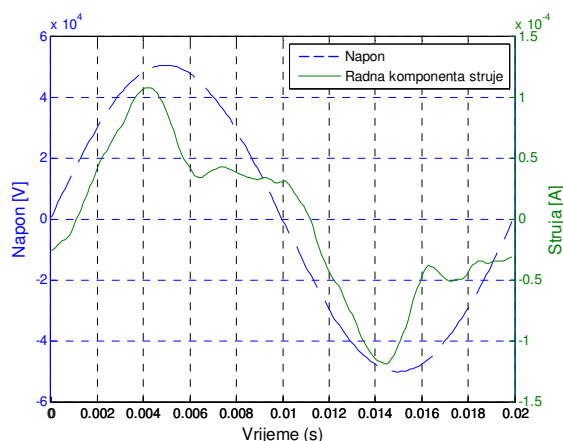
$$i_r = i_{r1} + \sum_n i_{rn}, \quad (3)$$

$$i_{rn} = i_{rn}' + i_{rn}'' \quad (4)$$

Komponenta struje i_{rn}' posljedica je nelinearne $U-I$ karakteristike odvodnika prenapona dok komponentu i_{rn}'' uzrokuju viši harmonici napona. Amplituda komponente i_{rn}'' ovisi o amplitudi napona U_n i faznom kutu Φ_n . Pri trajnom radnom naponu U_c struja kroz odvodnik većinom je kapacitivna, ali je prisutna i zanemarivo mala nesinusoidalna radna struja. Valni oblik ukupne struje odvodnika pri trajnom radnom naponu $U_c=36$ kV prikazan je na slici 2, a izdvojena radna komponenta struje je prikazana na slici 3.

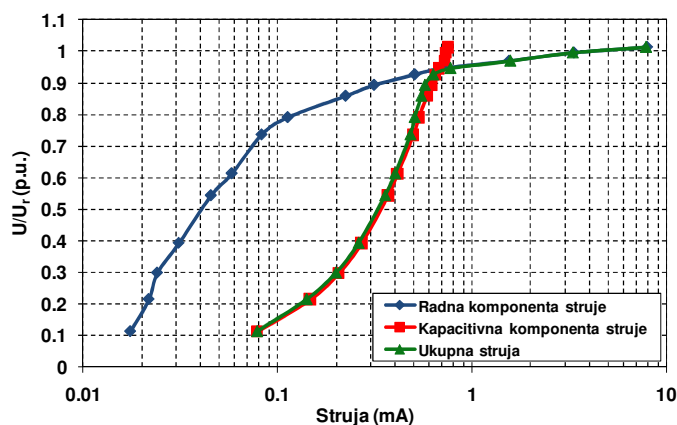


Slika 2. Valni oblici napona U_c i ukupne struje (amplituda struje $I=505.5 \mu\text{A}$)



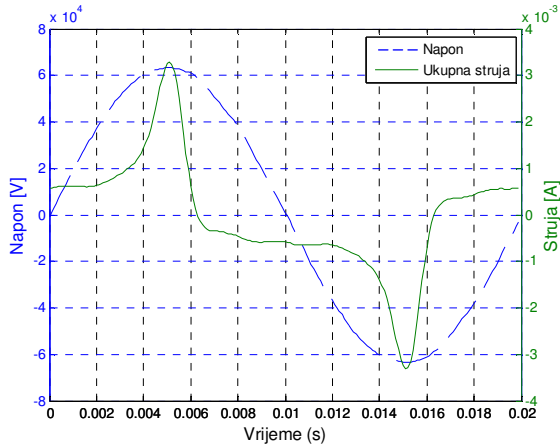
Slika 3. Valni oblici napona U_c i radne komponente struje (amplituda struje $I_R=112.5 \mu\text{A}$)

Radna komponenta struje stvara djelatne gubitke i zagrijava odvodnik prenapona. Povećanjem napona na odvodniku povećava se radna komponenta struje čiji se valni oblici značajno mijenjaju na koljenu $U-I$ karakteristike, koje predstavlja početak vođenja. $U-I$ karakteristike pri izmjeničnom naponu frekvencije 50 Hz prikazane su na slici 4.

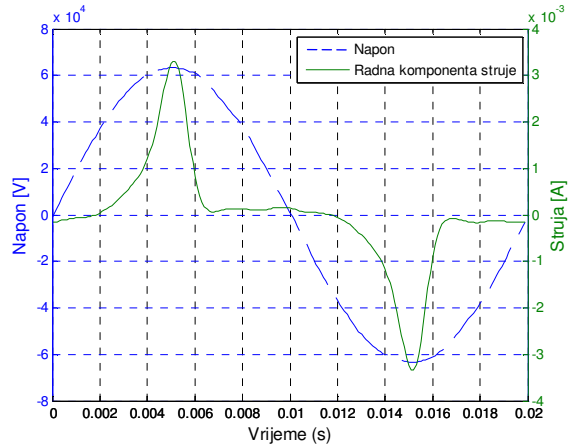


Slika 4. $U-I$ karakteristike pri izmjeničnom naponu

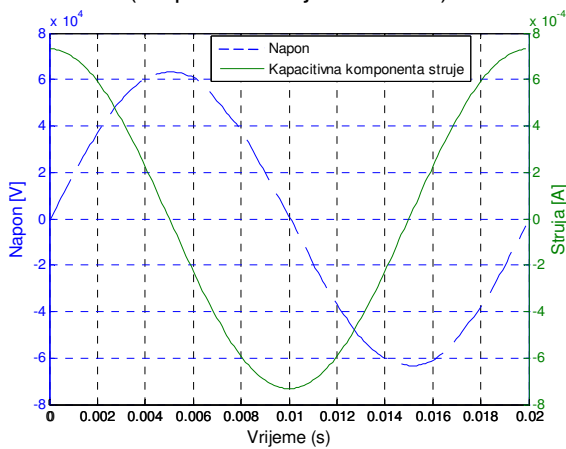
Kada vrijednost napona na odvodniku prijeđe koljeno $U-I$ karakteristike, kapacitivna komponenta struje postaje zanemariva u odnosu na radnu komponentu. Ukupna struja kroz odvodnik pri nazivnom naponu U_1 je prikazana na slici 5, radna komponenta struje na slici 6, a kapacitivna komponenta struje na slici 7.



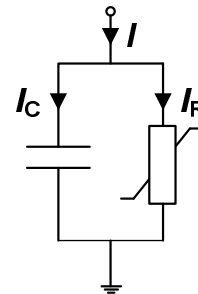
Slika 5. Valni oblici napona U_r i ukupne struje (amplituda struje $I=3.3$ mA)



Slika 6. Valni oblici napona U_r i radne komponente struje (amplituda struje $I_R=3.3$ mA)



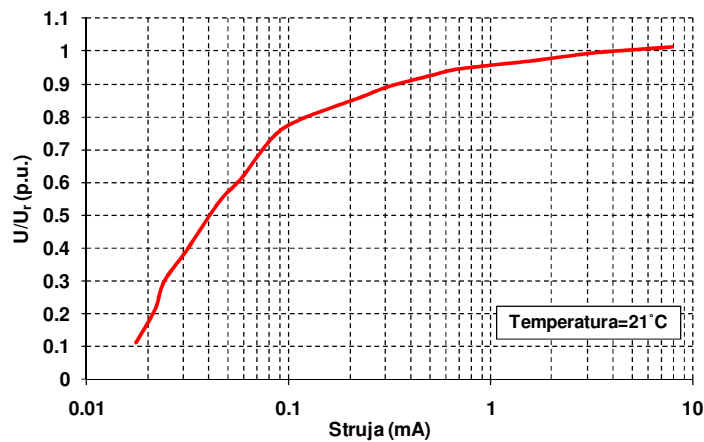
Slika 7. Valni oblici napona U_r i kapacitivne komponente struje (amplituda struje $I_C=0.73$ mA)



Slika 8. Model odvodnika prenapona za proračun energetskog opterećenja pri privremenim prenaponima

3. MODELIRANJE ODVODNIKA PRENAPONA

Proračun energetskog opterećenja pri privremenim prenaponima izvršen je u programskom paketu EMTP-RV [4], [5]. Model odvodnika prenapona prikazan je na slici 8, a sastoji se od paralelne kombinacije kondenzatora i nelinearnog otpornika čija je vrijednost određena prosječnom $U-I_R$ karakteristikom. Prosječnu $U-I_R$ karakteristiku tvore vršne vrijednosti dinamičkih $U-I_R$ karakteristika pri različitim vrijednostima napona (slika 9).



Slika 9. Prosječna $U-I_R$ karakteristika odvodnika prenapona

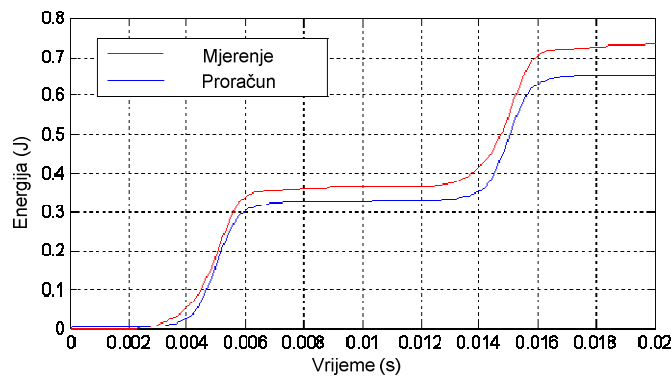
Energija odvodnika prenapona određena je sljedećim izrazom:

$$E = \int_0^t u(t) \cdot i_R(t) dt \quad (5)$$

Primjenom trapeznog pravila numeričke integracije gornji izraz prelazi u:

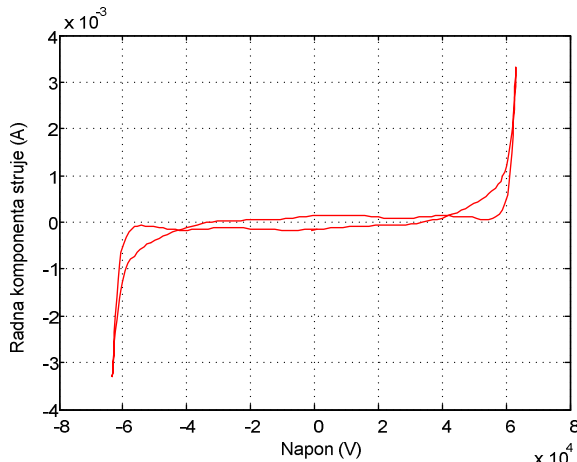
$$E = \sum_{k=1}^n \frac{u_k \cdot i_k + u_{k-1} \cdot i_{k-1}}{2} \cdot \Delta t \quad (6)$$

U EMTP-RV-u energija se određuje prema izrazu (6), a isti izraz je upotrebljen kako bi se izračunala energija iz izmjerenog napona i radne komponente struje. Usporedba rezultata mjerenja i proračuna energetskog opterećenja pri nazivnom naponu U_r prikazana je na slici 10. Energetsko opterećenje skokovito se povećava u trenutku kada napon na odvodniku, a time i radna komponenta struje dosegnu maksimalnu vrijednost.

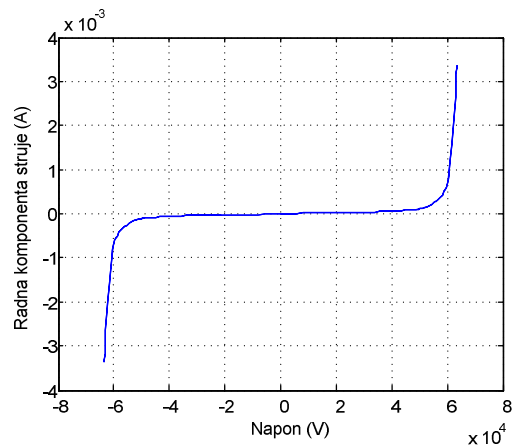


Slika 10. Usporedba mjerenja i proračuna energije pri nazivnom naponu U_r

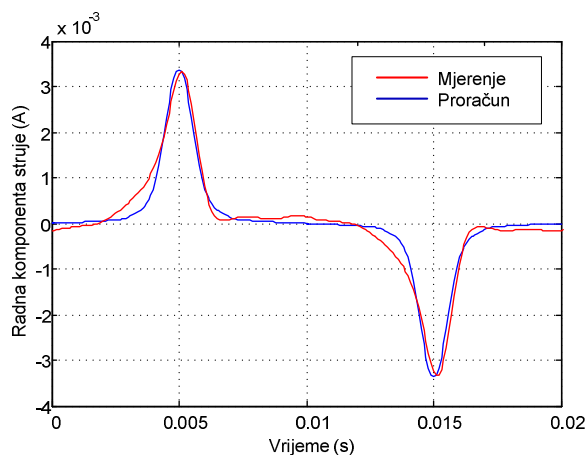
Razlike između rezultata proračuna i mjerenja nastaju zbog histereznog karaktera $U-I_R$ karakteristike (slika 11). Pri modeliranju odvodnika prenapona u EMTP-RV-u korištena je statička $U-I_R$ karakteristika prikazana na slici 12. Valni oblici izračunate i izmjerene radne komponente struje odvodnika prikazani su na slici 13. Usporedba harmoničkog spektra izmjerene i izračunate radne komponente struje I_R prikazana je na slici 14. Izmjerene dinamičke histerezne $U-I_R$ karakteristike pri različitim naponima prikazane su na slici 15. Utjecaj histereznog karaktera dinamičkih $U-I_R$ karakteristika na energetsko opterećenje veći je u području manjih struja i smanjuje se s povećanjem napona na odvodniku.



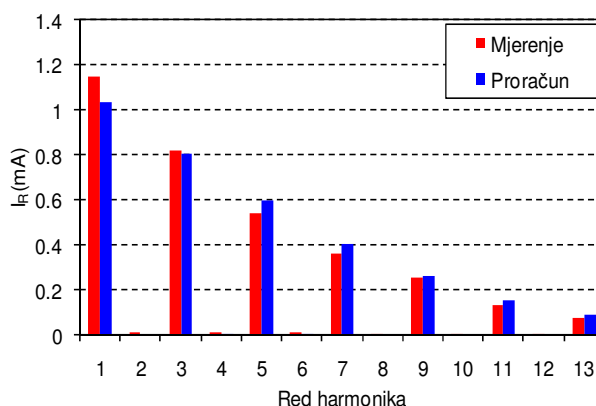
Slika 11. Izmjerena dinamička histerezna $U-I_R$ karakteristika pri nazivnom naponu U_r



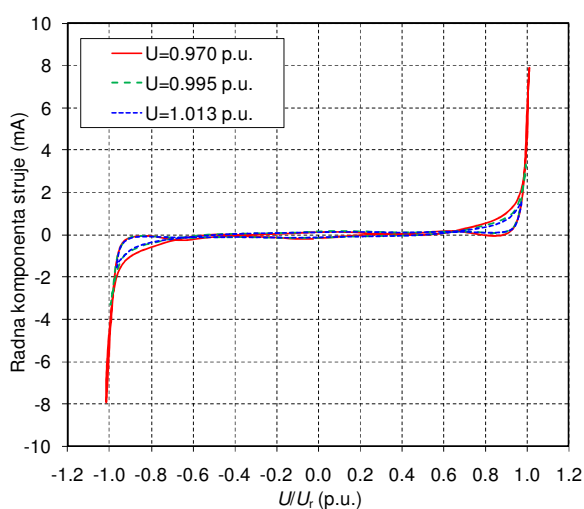
Slika 12. Statička $U-I_R$ karakteristika u EMTP-RV-u pri nazivnom naponu U_r



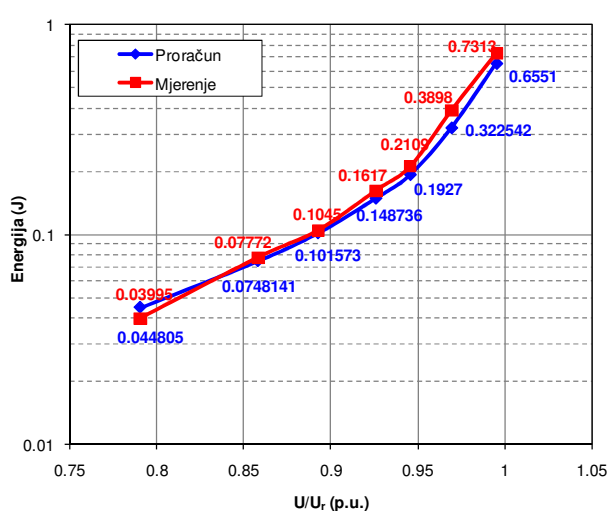
Slika 13. Valni oblici izmjerene i izračunate radne komponente struje I_R pri nazivnom naponu U_r



Slika 14. Usporedba harmoničkog spektra izmjerene i izračunate radne komponente struje I_R



Slika 15. Izmjerene dinamičke $U-I_R$ karakteristike pri različitim naponima

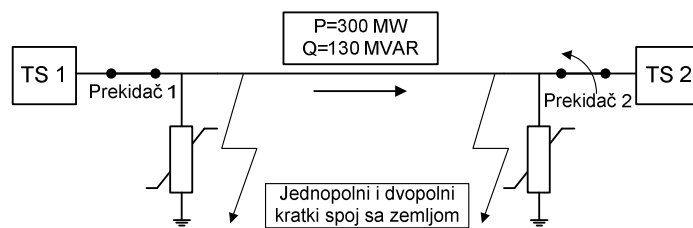


Slika 16. Usporedba mjerenja i proračuna energetske opterećenja

Usporedbu rezultata proračuna i mjerenja energetske opterećenja tijekom jedne periode prikazuje slika 16. Rezultati proračuna i mjerenja dobro se podudaraju u svim točkama karakteristike. Za točniji proračun energetske opterećenja odvodnika pri nižim iznosima prenapona potrebno je uzeti u obzir radnu komponentu struje kroz odvodnik. Velike greške u proračunu energetske opterećenja odvodnika prenapona moguće su ukoliko se koristi ukupna struja umjesto radne komponente struje [6].

4. PRORAČUN PRIVREMENIH PRENAPONA NA KOMPAKTIRANIM DALEKOVODIMA

Poseban problem predstavlja odabir prenaponske zaštite visokonaponskog kompaktnog dalekovoda u mreži s neuzemljenim ili djelomično uzemljenim zvjezdastima energetske transformatora. Kompaktirani dalekovodi imaju manje razmake među fazama te između faza i stupa od "klasičnih" dalekovoda istog naponskog nivoa. Ako se na postojećem dalekovodu prelazi na viši naponski nivo uz minimalne promjene u konstrukciji glave i uzemljivača stupova, prenaponske performanse dalekovoda značajno se ne mijenjaju. Kod prelaska s 220 kV na 400 kV naponski nivo javlja se problem previsokih sklopnih prenapona. U sljedećem primjeru analizirana je mogućnost primjene staničnih odvodnika s nižim preostalim naponom, tj. s nazivnim naponom nižim od najvećeg ekvivalentnog privremenog prenapona, za ograničenje sklopnih prenapona. Transformatorske stanice 1 i 2 povezane su 400 kilovoltnim kompaktnim dalekovodom (slika 17). Na krajevima dalekovoda nalaze se stanični odvodnici prenapona. Dalekovodom se prenosi snaga $P=300$ MW i $Q=130$ MVar iz TS 1 u TS 2. Razmatrana su dva različita ekvivalenta mreže: za struju jednofaznog kratkog spoja od 5 kA i 10 kA.



Slika 17. Konfiguracija mreže za koju su izračunati privremeni prenaponi

Analizirane su pojave sljedećih kvarova u TS 1 i TS 2:

- Jednopolni kratki spoj u fazi A na kraju dalekovoda (TS 2) i trolpolno otvaranje prekidača 2.
- Dvopolni kratki spoj u fazama B i C sa zemljom na kraju dalekovoda (TS 2) i trolpolno otvaranje prekidača 2.
- Jednopolni kratki spoj u fazi A na početku dalekovoda (TS 1) i trolpolno otvaranje prekidača 2.
- Dvopolni kratki spoj u fazama B i C sa zemljom na početku dalekovoda (TS 1) i trolpolno otvaranje prekidača 2.

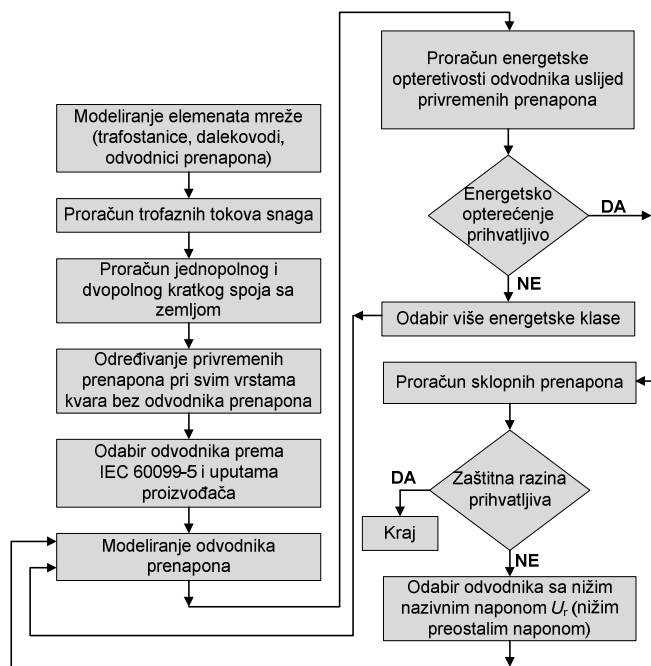
U proračunima je analiziran i problem zatajenja (ili kašnjenja) zaštite u TS 1. Prilikom kvara otvara se samo prekidač u TS 2. Parametarski je mijenjano vrijeme trajanja kvara, a zatim je određeno maksimalno dopušteno vrijeme nakon isklopa prekidača u TS 2 pri kojem se dosegne nazivna energetska podnosivost odvodnika.

5. ODABIR NAZIVNOG NAPONA ODVODNIKA PRENAPONA

Za prenaponsku zaštitu elektroenergetskih postrojenja, a posebno energetskih transformatora upotrebljavaju se odvodnici prenapona. Aktivni metal-oksidni dio odvodnika prenapona mora izdržati privremene, sklopne i atmosferske prenapone koji se mogu pojaviti u mreži. Za pravilan izbor nazivnog napona odvodnika prenapona potrebno je poznavati vrijednost privremenih prenapona koji se mogu pojaviti na mjestu ugradnje odvodnika. Izbor parametara odvodnika prenapona predstavlja kompromis u zadovoljenju slijedećih zahtjeva: što veća otpornost u odnosu na privremene prenapone; što bolje zaštitne karakteristike (niži preostali napon); što veća sposobnost apsorpcije energije (veća energetska podnosivost); što niža cijena. Povećanjem energetske klase i otpornosti odvodnika na privremene prenapone smanjuje se vjerojatnost da dođe do uništenja odvodnika, ali odvodnik slabije štiti opremu (veći preostali napon). Za optimalan odabir nazivnog napona odvodnika potrebno je što je moguće točnije poznavati vrijednosti i trajanje privremenih prenapona na mjestu priključka odvodnika prenapona.

Prema [7] nazivni napon odvodnika U_r treba biti jednak ili veći od najvećeg ekvivalentnog privremenog prenapona koji se može pojaviti u mreži. Moguće je izabrati i odvodnik s nižim nazivnim naponom u slučaju kada je potrebno ostvariti bolju prenaponsku zaštitu. Tada je potrebno napraviti detaljan proračun energetske opterećenja odvodnika pri privremenim prenaponima.

Metoda za odabir nazivnog napona metal-oksidnih odvodnika prenapona koja se temelji na proračunu energetske opterećenja odvodnika prikazana je na slici 18. U radu nije prikazan dio proračuna sklopnih prenapona, nego je na temelju proračuna energetske opterećenja pri privremenim prenaponima odabran odvodnik s nižim nazivnim naponom. Za prethodno navedeni primjer (slika 17) prema [7] odabran je odvodnik prenapona sa $U_r=342$ kV energetske klase 4 (nazivna energetska podnosivost 2394 kJ). Zatim su provedeni proračuni energetske opterećenja pri privremenim prenaponima na odvodniku s nižim nazivnim naponom $U_r=330$ kV (nazivna energetska podnosivost 2310 kJ). Za modeliranje odvodnika prenapona u EMTP-RV-u korišteni su podaci proizvođača prikazani u tablici I.



Slika 18. Metoda za odabir nazivnog napona odvodnika prenapona koja se temelji na proračunu energetskog opterećenja odvodnika

Tablica I. Statička $U-I_R$ karakteristika

Struja [A]	$U_r=330$ kV	$U_r=342$ kV
	Napon [kV]	
0,003	467	484
0,01	471	488
0,1	485	503
1	509	527
10	542	561
100	593	619
200	608	631
300	616	639
400	623	647
500	627	650
600	631	654
700	635	658
800	638	662
900	642	666
1000	644	667

6. REZULTATI PRORAČUNA

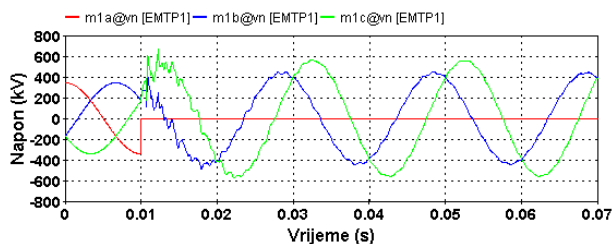
Iz proračuna trofaznih tokova snaga određeni su naponi na početku i kraju dalekovoda, a zatim iz proračuna jednofaznog i dvofaznog kratkog spoja privremeni prenaponi [8]. U tablicama II i III su za sve vrste kvarova određene maksimalne vrijednosti privremenih prenapona u p.u. u prijelaznom (U_{max}) i stacionarnom stanju (U_{st}) za sljedeće slučajeve: 1 – početak dalekovoda (TS 1) za vrijeme trajanja kvara; 2 – početak dalekovoda (TS 1) nakon otvaranja prekidača 2; 3 – kraj dalekovoda (TS 2) za vrijeme trajanja kvara; 4 – kraj dalekovoda (TS 2) nakon otvaranja prekidača 2. Kod proračuna privremenih prenapona velikim brojem simulacija za svaki kvar određeno je najnepovoljnije vrijeme njegova nastanka. Rezultati proračuna privremenih prenapona prikazani su na slikama 19 - 22. Slike 23 i 24 prikazuju energetsko opterećenje i struje kroz odvodnike s nazivnim naponom $U_r=330$ kV za slučaj c), za mrežu s $I_{ks1}=5$ kA u TS 2. U tablicama IV i V prikazane su promjene energetskog opterećenja odvodnika s nazivnim naponom 342 kV i 330 kV u ovisnosti o vremenu trajanja kvara i vremenu nakon otvaranja prekidača u TS 2.

Tablica II. – Rezultati proračuna privremenih prenapona za $I_{k1}=5$ kA

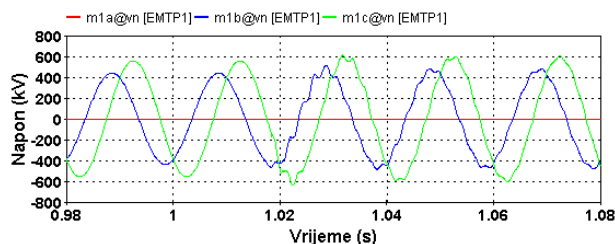
	a)				b)				c)				d)					
	U_{maxC}	U_{stC}	U_{maxB}	U_{stB}	U_{maxA}	U_{stA}	U_{maxC}	U_{stC}	U_{maxB}	U_{stB}	U_{maxA}	U_{stA}	U_{maxC}	U_{stC}	U_{maxB}	U_{stB}	U_{maxA}	U_{stA}
Bez odvodnika																		
1	1.61	1.51	1.13	1.03	1.40	1.29	1.93	1.63	1.42	1.28	1.66	1.41						
2	1.54	1.45	1.15	1.02	1.36	1.29	1.91	1.73	1.52	1.38	1.57	1.47						
3	1.88	1.59	1.38	1.25	1.62	1.38	1.58	1.49	1.17	1.07	1.40	1.28						
4	1.68	1.52	1.40	1.18	1.49	1.37	2.06	1.74	1.66	1.39	1.83	1.48						
Sa odvodnicima $U_r=342$ kV																		
1	1.58	1.51	1.13	1.03	1.40	1.29	1.81	1.63	1.40	1.28	1.64	1.41						
2	1.53	1.45	1.14	1.02	1.36	1.29	1.78	1.72	1.40	1.38	1.57	1.47						
3	1.79	1.59	1.37	1.25	1.61	1.38	1.54	1.49	1.17	1.07	1.40	1.28						
4	1.65	1.51	1.38	1.18	1.49	1.37	1.82	1.73	1.45	1.40	1.76	1.48						
Sa odvodnicima $U_r=330$ kV																		
1	1.56	1.51	1.13	1.03	1.42	1.29	1.76	1.63	1.39	1.28	1.62	1.41						
2	1.52	1.45	1.13	1.02	1.36	1.29	1.73	1.71	1.42	1.41	1.56	1.47						
3	1.74	1.59	1.36	1.25	1.59	1.38	1.52	1.49	1.17	1.07	1.39	1.28						
4	1.63	1.51	1.37	1.18	1.49	1.37	1.75	1.71	1.48	1.45	1.72	1.48						

Tablica III. – Rezultati proračuna privremenih prenapona za $I_{k1}=10$ kA

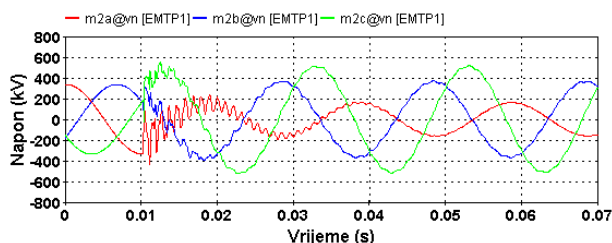
	a)				b)				c)				d)					
	U_{maxC}	U_{stC}	U_{maxB}	U_{stB}	U_{maxA}	U_{stA}	U_{maxC}	U_{stC}	U_{maxB}	U_{stB}	U_{maxA}	U_{stA}	U_{maxC}	U_{stC}	U_{maxB}	U_{stB}	U_{maxA}	U_{stA}
Bez odvodnika																		
1	1.44	1.39	1.12	0.94	1.40	1.20	1.89	1.62	1.38	1.29	1.67	1.41						
2	1.40	1.30	1.04	0.95	1.24	1.19	1.75	1.71	1.44	1.37	1.53	1.46						
3	1.84	1.58	1.34	1.25	1.64	1.37	1.41	1.37	1.12	0.96	1.40	1.19						
4	1.59	1.40	1.29	1.14	1.48	1.31	1.99	1.72	1.60	1.38	1.57	1.47						
Sa odvodnicima $U_r=342$ kV																		
1	1.43	1.39	1.11	0.94	1.40	1.20	1.80	1.62	1.39	1.29	1.65	1.41						
2	1.40	1.30	1.04	0.95	1.24	1.19	1.74	1.71	1.39	1.37	1.52	1.46						
3	1.77	1.58	1.35	1.25	1.62	1.37	1.41	1.37	1.10	0.96	1.40	1.19						
4	1.58	1.40	1.29	1.14	1.48	1.31	1.81	1.71	1.46	1.39	1.57	1.47						
Sa odvodnicima $U_r=330$ kV																		
1	1.43	1.39	1.10	0.94	1.39	1.20	1.75	1.62	1.40	1.29	1.62	1.41						
2	1.40	1.30	1.04	0.95	1.24	1.19	1.71	1.70	1.38	1.37	1.52	1.46						
3	1.73	1.58	1.35	1.25	1.59	1.37	1.41	1.37	1.10	0.96	1.38	1.19						
4	1.59	1.40	1.28	1.14	1.48	1.31	1.74	1.70	1.46	1.40	1.56	1.46						



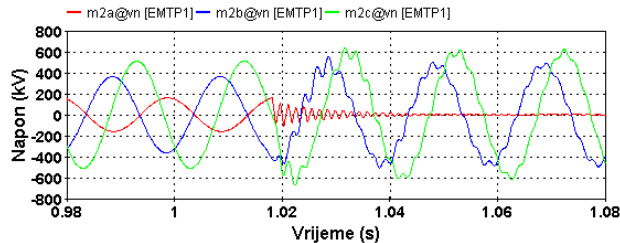
Slika 19. Naponi u TS 1 za vrijeme trajanja kvara



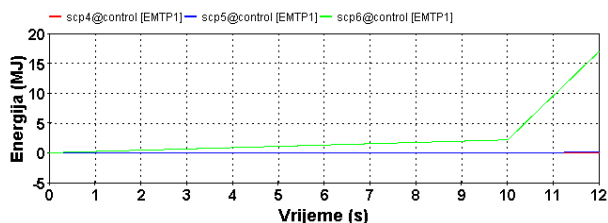
Slika 20. Naponi u TS 1 nakon otvaranja prekidača 2



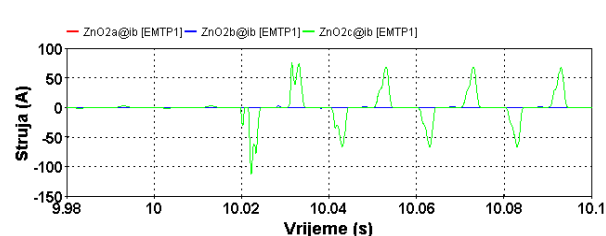
Slika 21. Naponi u TS 2 za vrijeme trajanja kvara



Slika 22. Naponi u TS 2 nakon otvaranja prekidača 2



Slika 23. Energetsko opterećenje odvodnika u fazi C u TS 2 za vrijeme trajanja kvara i nakon otvaranja prekidača 2 (10.02 ms)



Slika 24. Struje kroz odvodnike u TS 2 za vrijeme trajanja kvara i nakon otvaranja prekidača 2 (10.02 ms)

Tablica IV. Promjena energetskog opterećenja odvodnika [kJ/s] za $I_{k1}=5$ kA

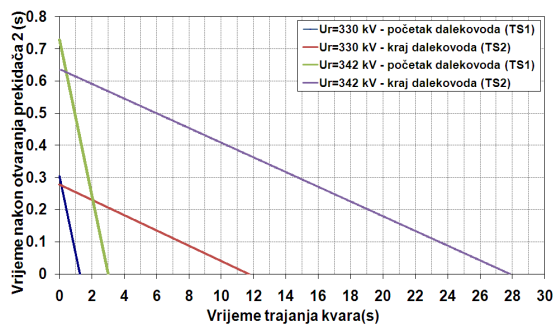
U_f (kV)	Nazivna energetska podnosivost (kJ)	a)	b)	c)	d)
330	2310	TS 1 za vrijeme trajanja kvara			
		285.03	8.64	1823.1	63.6
		TS 1 nakon otvaranja prekidača 2			
		112.75	9.32	7561.8	150
		TS 2 za vrijeme trajanja kvara			
		942.79	34.61	197.44	7.86
342	2394	TS 2 nakon otvaranja prekidača 2			
		309.75	33.73	8298.8	176
		TS 1 za vrijeme trajanja kvara			
		126.19	2.399	793.8	24.8
		TS 1 nakon otvaranja prekidača 2			
		47.48	2.63	3277.5	64.7
TS 2 za vrijeme trajanja kvara					
424.51	12.28	85.967	2.14		
TS 2 nakon otvaranja prekidača 2					
138.39	11.92	3759.2	76.9		

Tablica V. Promjena energetskog opterećenja odvodnika [kJ/s] za $I_{k1}=10$ kA

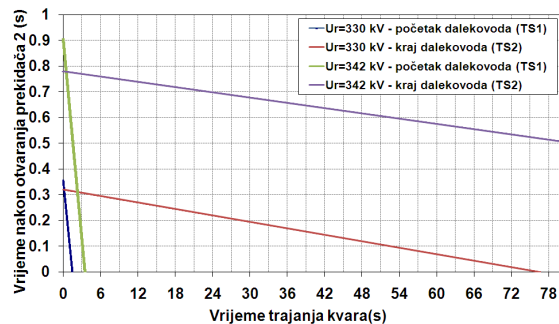
U_f (kV)	Nazivna energetska podnosivost (kJ)	a)	b)	c)	d)
330	2310	TS 1 za vrijeme trajanja kvara			
		42.0	2.00	1560.8	60.76
		TS 1 nakon otvaranja prekidača 2			
		10.1	1.619	6476.9	119.9
		TS 2 za vrijeme trajanja kvara			
		817	33.64	30.185	1.74
342	2394	TS 2 nakon otvaranja prekidača 2			
		47.3	12.23	7224.3	140.9
		TS 1 za vrijeme trajanja kvara			
		15.4	0.39	684.39	23.55
		TS 1 nakon otvaranja prekidača 2			
		160	0.307	2643.7	50.72
TS 2 za vrijeme trajanja kvara					
367	11.88	10.459	0.331		
TS 2 nakon otvaranja prekidača 2					
17.6	3.641	3070	60.38		

Sa slika 25 i 26 može se za određeno vrijeme trajanja kvara očitati maksimalno dopušteno vrijeme nakon otvaranja prekidača 2 pri kojemu je dosegnuta nazivna energetska opteretivost odvodnika. Ako su poznata podešenja zaštite u TS 1 i TS 2, iz ovih krivulja lako je odrediti da li je dosegnuta nazivna energetska opteretivost odvodnika.

Odvodnici se najviše energetski opterećuju u slučaju c) nakon otvaranja prekidača 2, zbog nastanka kombiniranog privremenog prenapona uslijed kratkog spoja i Ferrantijevog efekta. Iznosi privremenih prenapona i energetska opterećenja odvodnika veća su za slučaj $I_{k1}=5$ kA.



Slika 25. Dosegnuta nazivna energetska podnosivost odvodnika (slučaj c) za mrežu sa $I_{k1}=5$ kA



Slika 26. Dosegnuta nazivna energetska podnosivost odvodnika (slučaj c) za mrežu sa $I_{k1}=10$ kA

7. ZAKLJUČAK

U radu je opisan postupak proračuna energetske opterećenja odvodnika pri privremenim prenaponima. Provedena su laboratorijska mjerenja na odvodniku prenapona na temelju kojih je izrađen model odvodnika u programu za proračun elektromagnetskih prijelaznih pojava EMTP-RV. Rezultati proračuna i mjerenja energetske opterećenja odvodnika dobro se podudaraju.

Razvijena je metoda za izbor nazivnog napona odvodnika prenapona. Ovom metodom moguće je izabrati odvodnik s boljim zaštitnim karakteristikama (nižim preostalim naponom), a koji se neće energetski preopteretiti uslijed privremenih prenapona. Proračun je napravljen na primjeru kompaktiranog 400 kV dalekovoda. Analizirani su kombinirani privremeni prenaponi koji su izazvani nastupom jednopolnog i dvopolnog kratkog spoja sa zemljom i Ferrantijevim efektom. Za navedene privremene prenapone napravljen je proračun energetske opterećenja odvodnika. Prema [7] izabran je odvodnik s nazivnim naponom $U_n=342$ kV. Rezultati proračuna pokazuju da bi odvodnik s $U_n=330$ kV za određena podešenja zaštite mogao biti instaliran bez opasnosti od energetske preopterećenja uslijed privremenih prenapona. Ovaj odvodnik ima bolje zaštitne karakteristike (niži preostali napon) od odvodnika s $U_n=342$ kV i učinkovitije bi ograničio sklopne prenapone, a time je poboljšana prenaponska zaštita kompaktiranog dalekovoda.

Nakon odabira odvodnika prema prikazanoj metodi, potrebno je provjeriti iznose sklopnih prenapona na kompaktiranom dalekovodu. U slučaju da oni i dalje budu preveliki, potrebno je odrediti točne lokacije na dalekovodu na kojima bi se ugradili odvodnici prenapona [9], [10].

8. LITERATURA

- [1] A. Legate, J. Brunke, J. Ray, E. Yasuda, "Elimination of closing resistors on EHV Circuit Breakers", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 3, No. 1, January 1988, p. 223.
- [2] J. Ribeiro, M. McCallum, "An application of metal-oxide surge arresters in the elimination of need for closing resistors in EHV breakers", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, January 1989, p. 282.
- [3] H. Zhu, M. R. Raghuvier, "Influence of representation model and Voltage Harmonics on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 16, No. 4, October 2001.
- [4] 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.
- [5] J. Mahseredjian, C. Dewhurst, "Using EMTP Tutorials and Reference", Hydro-Québec/IREQ, 2007.
- [6] G. R. S. Lira, D. Fernandes Jr. and E. G. Costa "Computation of Energy Absorption and Residual Voltage in Metal Oxide Surge Arrester from Digital Models and Lab Tests: A Comparative Study", *IPST*, Lyon, France, June 4-7, 2007.
- [7] IEC 60099-5: "Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations", Edition 1.1, 2000.
- [8] B. Filipović-Grčić, I. Uglešić, A. Xemard, "Selection of station surge arresters for control of slow-front overvoltages on compact lines", *CIGRE C4 Colloquium on: Lightning and Power Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010. pp. 1-14.
- [9] H. Seyedi, M. Sanaye-Pasand, M. R. Dadashzadeh, "Application of Transmission Line Surge Arresters to Reduce Switching Overvoltages", *IPST*, Montreal, Canada on June 19-23, 2005, Paper No. IPST05 – 082.
- [10] L. Stenström, M. Mobedjina, "Limitation of switching overvoltages by use of transmission line surge arresters", *ABB Switchgear Sweden, SC 33 International conference CIGRE*, Zagreb, Croatia 1998.