

PRENAPONI I STRUJE PRI UKLJUČENJU I ISKLJUČENJU VISOKONAPONSKIH MOTORA U MREŽI 6 KV SARTID-A

Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvic, Ninoslav Simić
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Sadržaj: U radu su dati rezultati eksperimentalnih istraživanja prenapona i struja pri uključenju i isključenju visokonaponskih motora u mrežama 6 kV Sartid-a. Izvršena su u sklopu istraživanja prelaznih naponskih i strujnih režima u mrežama 6 kV koja su zajednički finansirali Ministarstvo za nauku, tehnologiju i razvoj i Sartid. Rezultati istraživanja su ukazali na mere koje treba preduzeti u cilju povećanja pouzdanosti rada visokonaponskih motora u mrežama 6 kV industrijskih postrojenja.

Ključne reči: prenapon/motor/prekidač/struja

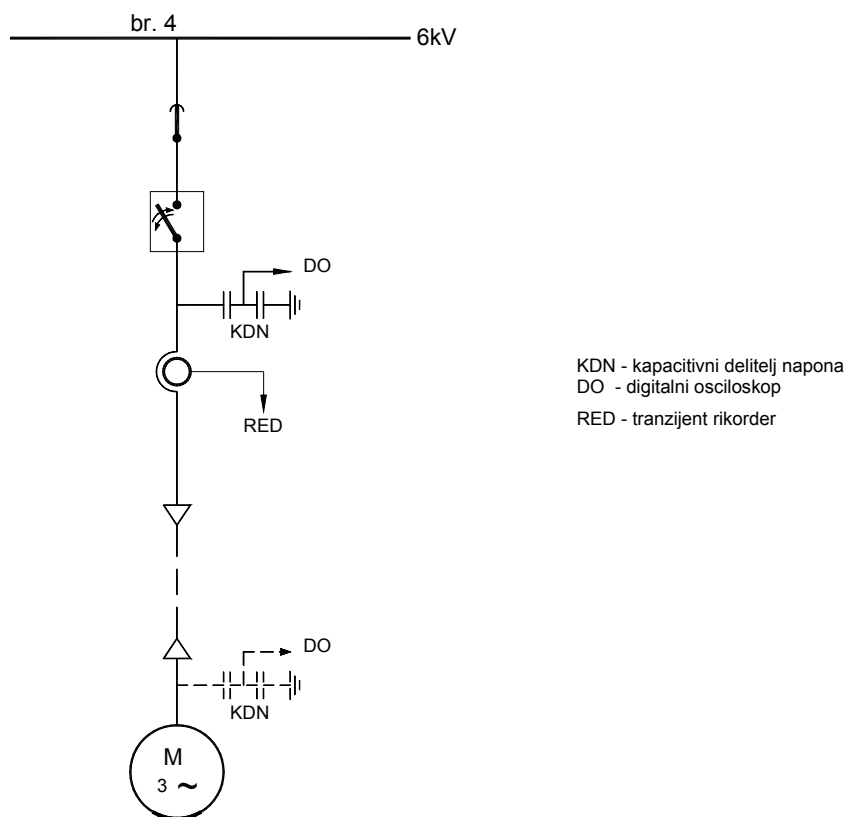
1. UVOD

Operacije sklopnim aparatima u mrežama 6 kV, slično kao i u drugim mrežama visokih napona, dovode do pojave prenapona. Oblik, visina, učestanost i trajanje sklopnih prenapona zavise od parametara mreže i osobina sklopnog aparata. Sklopni aparat može bitno da doprinese povećanju prenapona. Ako se u njegovoj komori u procesu uključenja pojavljuju višestruka paljenja i gašenja električnog luka (prethodna paljenja električnog luka) javljaju se znatno viši prenaponi nego kada ova pojava nije prisutna. Veoma visoki prenaponi nastaju u procesu isključenja, ako u njegovoj komori dolazi do ponovnih nastajanja električnog luka (ponovnih paljenja i ponovnih proboja), ili ako dolazi do sečenja struje pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Ove pojave su obično prisutne kod sklopnih aparata koji se koriste u mrežama 6 kV, 10 kV, 20 kV i 35 kV.

U ovom radu su dati rezultati eksperimentalnih istraživanja prenapona koji se javljaju u mrežama 6 kV Sartid-a pri uključenju i isključenju visokonaponskih motora. Analiziran je njihov uticaj na izolaciju namotaja statora motora.

2. PRENAPONI PRI UKLJUČENJU I ISKLJUČENJU MOTORA 6 kV

U mrežama 6 kV Sartid-a izvršena su snimanja prelaznih napona i struja pri uključenju i isključenju šest visokonaponskih motora 6 kV sa kratkospojenim rotorom snage od 450 kW do 850 kW. Prelazni fazni naponi su snimani na ulazu u kablovske vodove motora ili na priključcima motora koristeći kapacitivne delitelje napona i digitalne osciloskope. Kapacitivni delitelji napona verno prenose pojave sa visokog na niski napon od 1 MHz do nekoliko Hz. Prelazne struje su snimane tranzijent rikorderom koristeći postojeće strujne transformatore u kablovskim vodovima motora. Uobičajena šema za istraživanja prelaznih faznih napona i struja pri uključenju i isključenju motora data je na slici 1.



Slika 1. Jednopolna šema prema kojoj su izvršena istraživanja prenapona i struja pri uključenju i isključenju motora 6 kV.

Istraživanja prenapona su izvršena pri uključenju i isključenju sledećih 6 kV motora: motora recirkulacione pumpe 630 kW (M1), motora pumpe industrijske vode 630 kW (M3), motora za čeličanu 500 kW (M3), motora recirkulacione pumpe 450 kW (M4), motora dimososa 850 kW (M5) i motora pumpe industrijske vode 800 kW (M6). Broj izvedenih ciklusa operacija uključenje-isključenje prekidača se kretao od 6 do 11. Određen broj isključenja je izveden u toku zaleta motora. Prekidači sa kojima su uključivani i isključivani motori su malouljni tipa A i tipa B dva različita proizvođača

U tabeli 1 dati su za svaki motor: tip prekidača sa kojim je uključivan i isključivan, broj uključenja (n_u), broj isključenja u normalnom radu (n_l), broj isključenja u zaletu (n_{lz}), srednja (u_{sr}) i maksimalna (u_{max}) vrednost prenapona u uzorku za svaku od operacija. Prenaponi su dati u relativnim jedinicama (r.j.) kao odnos maksimalne vrednosti prelaznih faznih napona i temene vrednosti (amplitude) napona ustaljenog režima pre (za isključenja) ili posle (za uključenja) operacije prekidača.

U tabeli 2 dati su za svaki motor: broj uključenja (n_u), srednja (i_{sr}) i maksimalna (i_{max}) vrednost udarne komponente struja u uzorku i vreme zaleta (t_z).

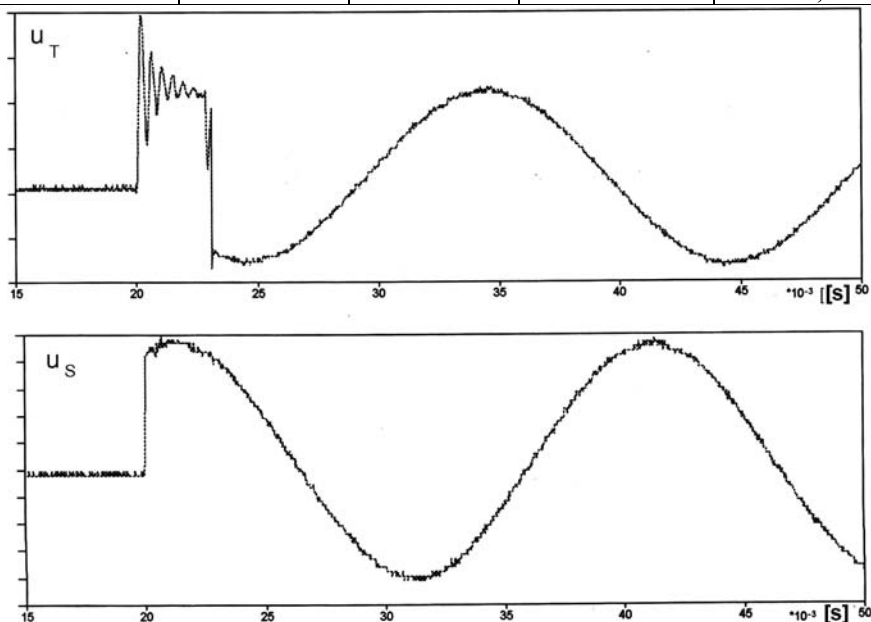
Primeri radi na slikama od 2 do 6 dati su prelazni fazni naponi na ulazu u kablovski vod motora 6 kV pri njihovom uključenju, isključenju u toku normalnog rada i isključenju u zaletu, a na slikama 7 i 8 prelazne struje pri uključenju motora.

Tabela 1. Prenaponi na izolaciji namotaja statora 6 kV motora

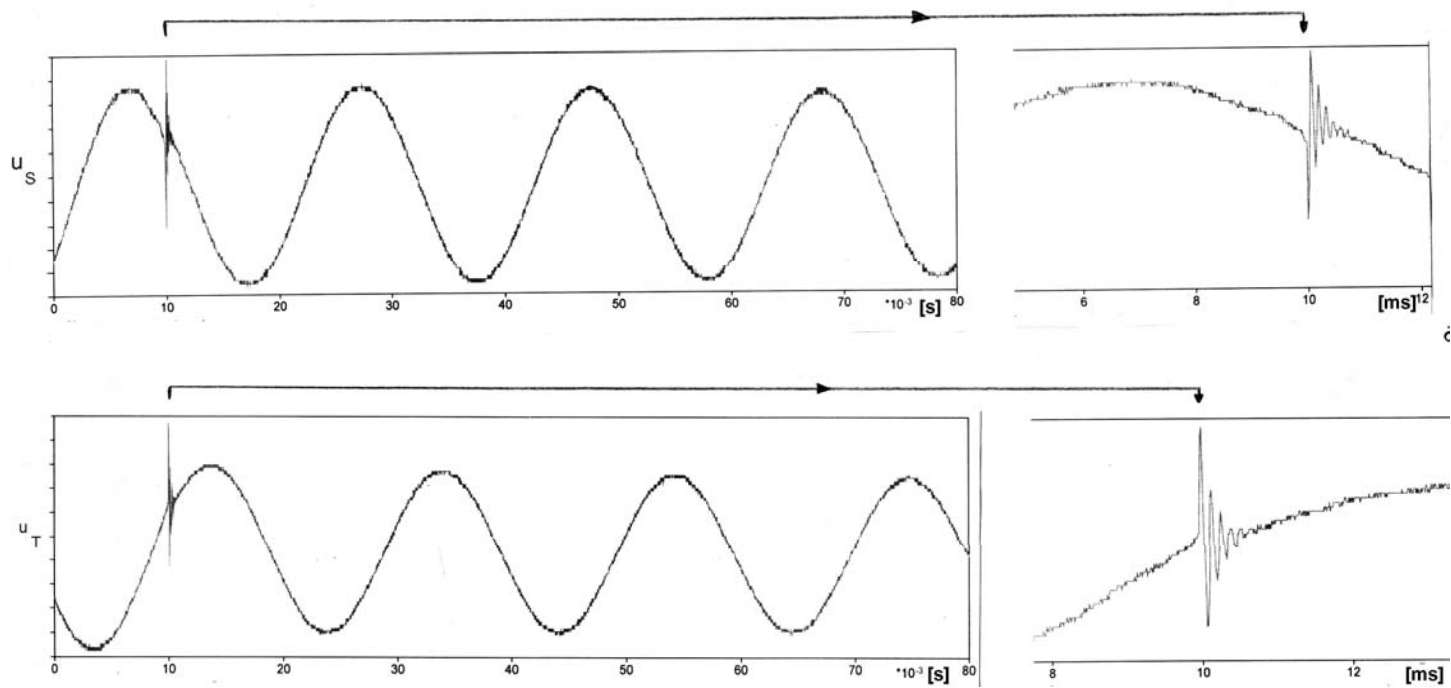
Motor 6 kV	Preki dač	Broj operacija prekidača i vrednosti prenapona								
		uključenje			isključenje u toku normalnog rada			isključenje u zaletu		
		n_U	u_{sr} (r.j.)	u_{max} (r.j.)	n_I	u_{sr} (r.j.)	u_{max} (r.j.)	n_{IZ}	u_{sr} (r.j.)	u_{max} (r.j.)
M1-630 kW	tip A	11	1,26	2,00	4	1,01	1,05	5	1,86	2,60
M2-630 kW	tip B	7	1,19	1,83	3	1,45	1,70	4	1,94	3,65
M3-500 kW	tip B	10	1,23	1,65	3	1,29	2,05	7	2,39	4,30
M4-450 kW	tip A	8	1,21	1,70	3	1,01	1,10	5	2,42	3,60
M5-850 kW	tip A	7	1,41	1,95	4	1,03	1,10	3	2,21	2,65
M6-800 kW	tip A	6	1,30	1,83	3	1,01	1,05	3	2,06	2,80

Tabela 2. Udarne struje uključenja 6 kV motora

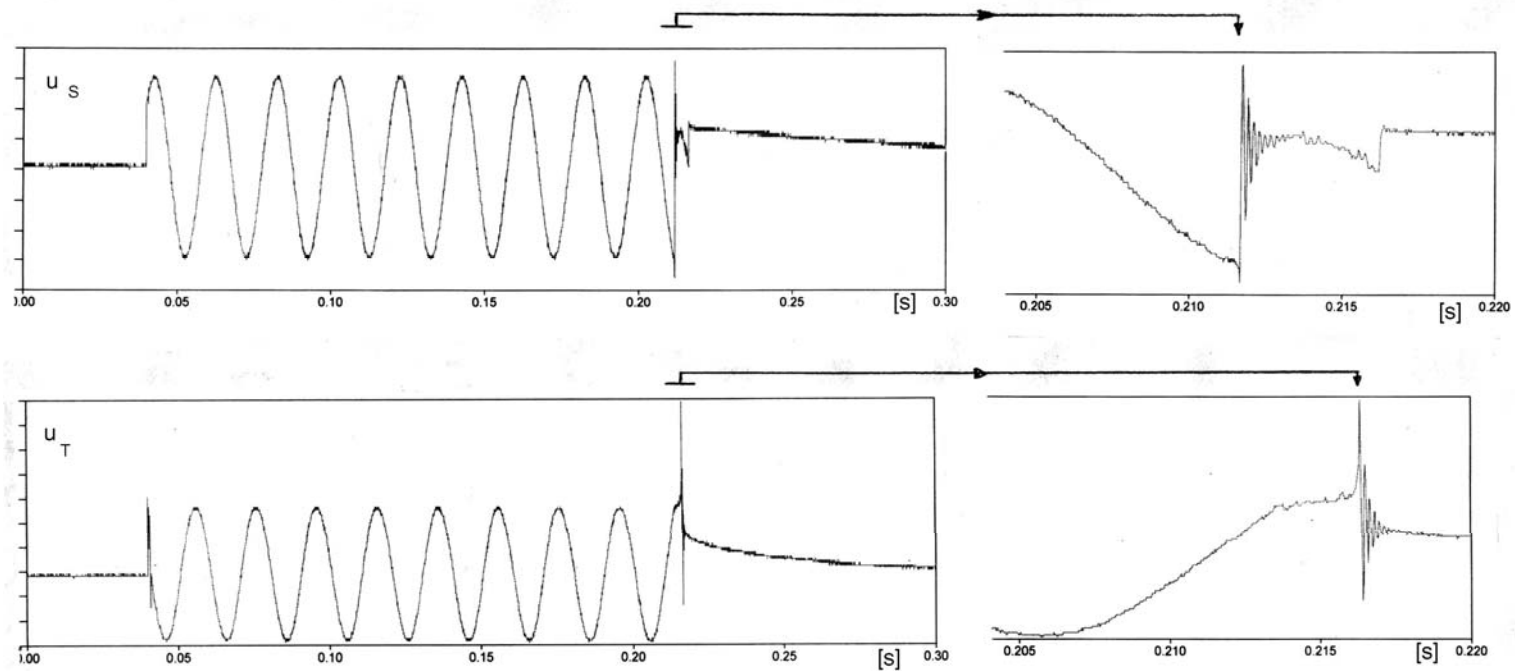
Motor	Broj uključenja i vrednosti udarnih struja			Vreme zaleta t_z [s]
	n_U	i_{sr} (A _{tv})	i_{max} (A _{tv})	
M2-630 kW	7	730	905	1,4
M3-500 kW	10	598	730	1,5
M4-850 kW	8	1022	1255	1
M5-850 kW	7	1484	1650	>6
M6-800 kW	6	535	650	4,4



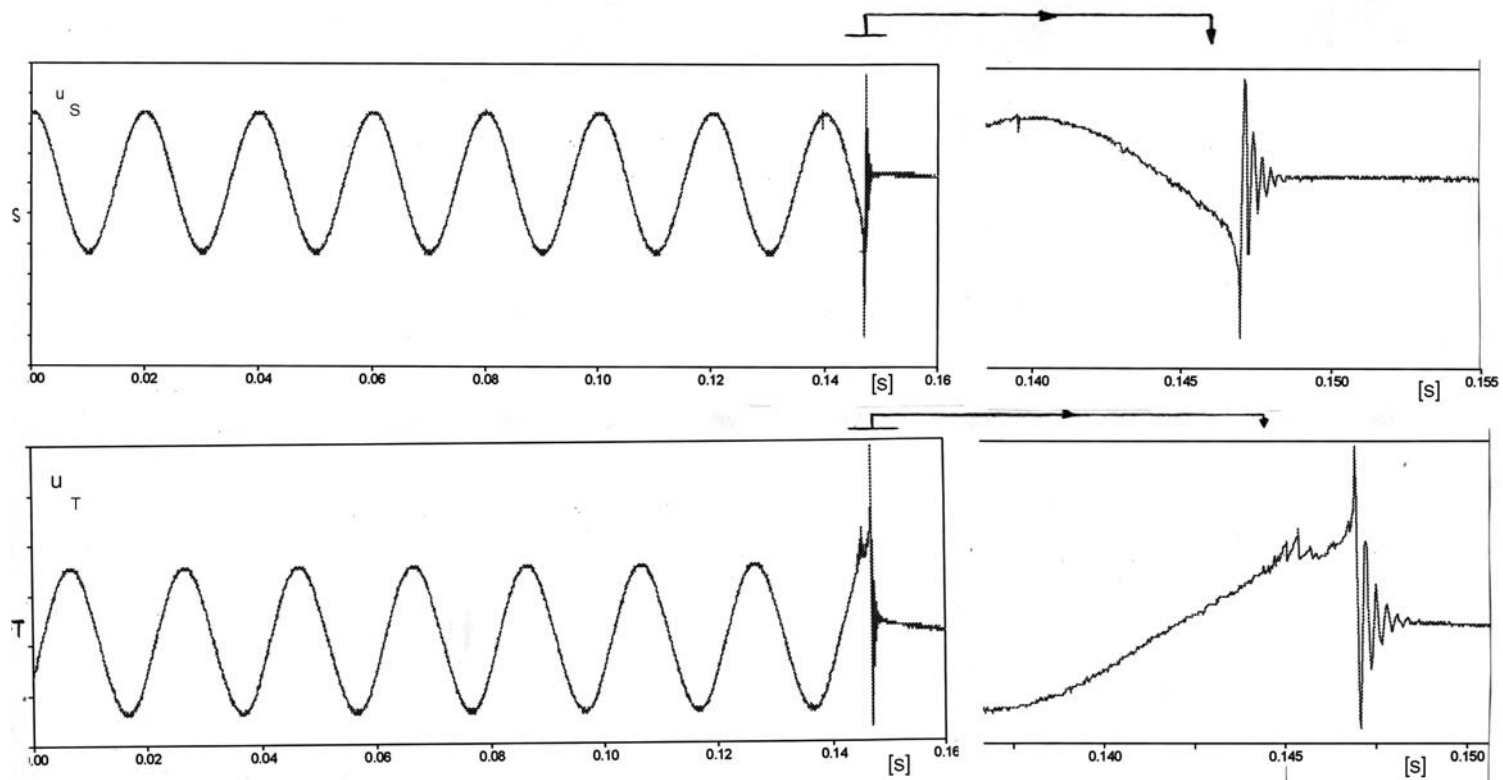
Slika 2. Prelazni fazni naponi u_S i u_T na ulazu u kablovski vod motora recirkulacione pumpe 6 kV, 630 kW u Pumpnoj stanici recirkulacije pri njegovom uključenju.



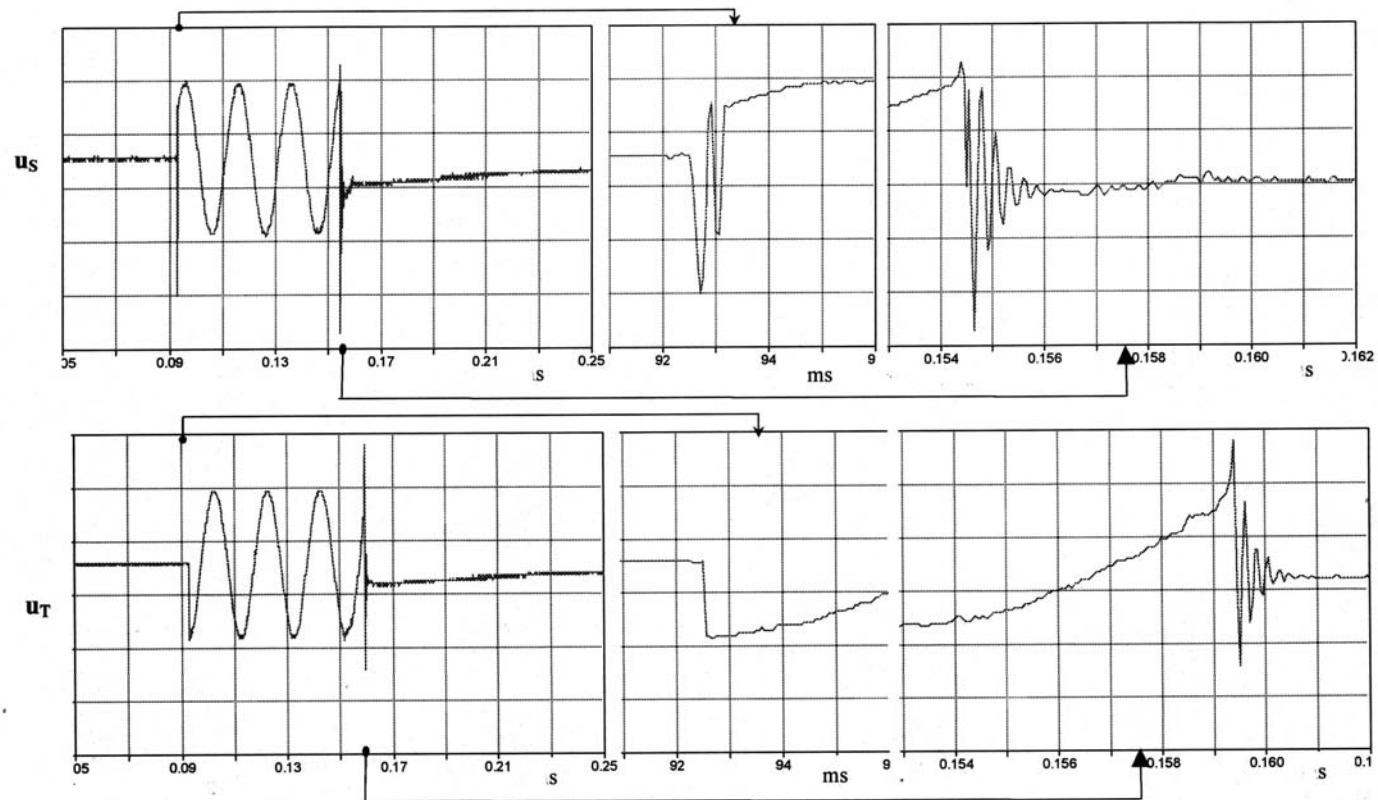
Slika 3. Prelazni fazni naponi u_S i u_T na ulazu u kablovski vod motora industrijske vode 6 kV, 630 kW pri njegovom isključenju.



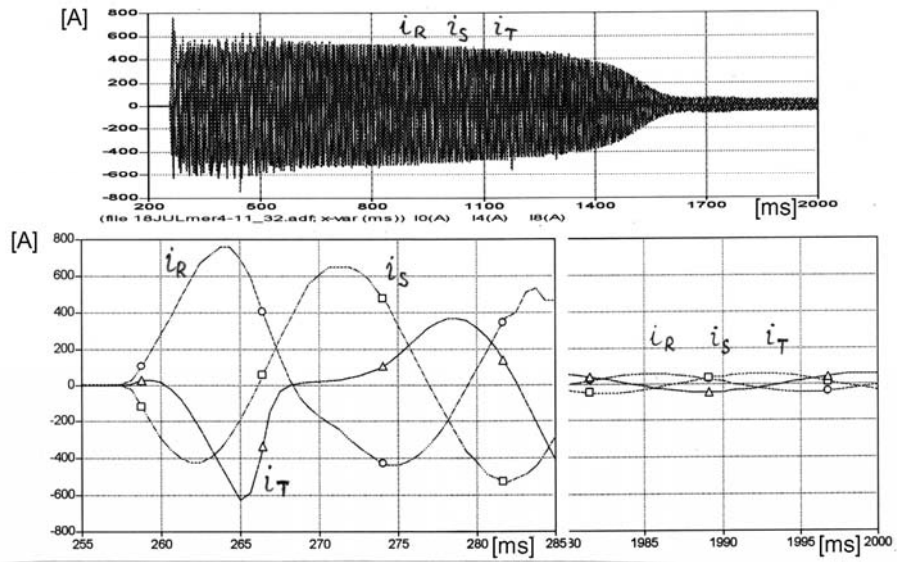
Slika 4. Prelazni fazni naponi u_s i u_T na ulazu u kablovski vod motora za čeličanu 6 kV, 500 kW pri njegovom uključenju i isključenju u toku zaleta.



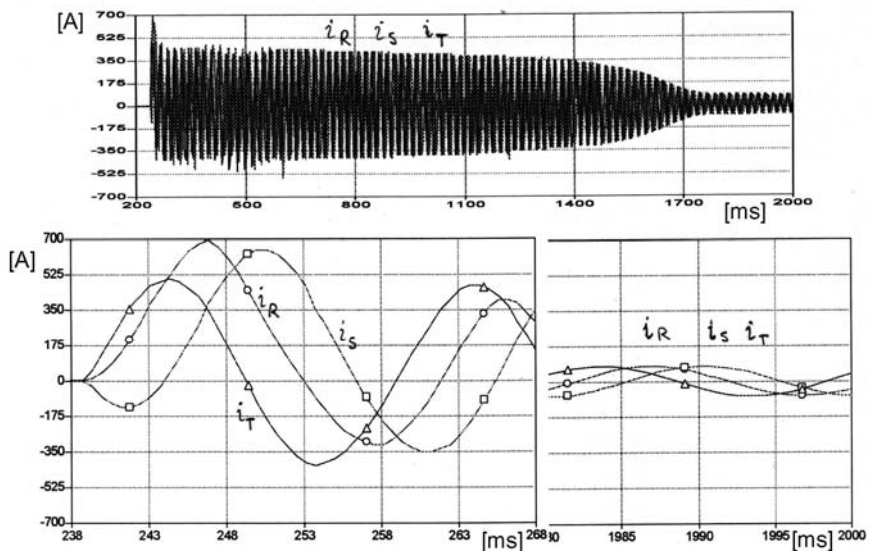
Slika 5. Prelazni fazni naponi u_S i u_T na ulazu u kablovski vod motora recirkulacione pumpe 6 kV, 630 kW pri njegovom isključenju u toku zaleta.



Slika 6. Prelazni fazni naponi u_S i u_T na ulazu u kablovski vod motora dimososa 6 kV, 850 kW pri njegovom uključenju i isključenju u toku zaleta.



Slika 7. Prelazne struje i_R , i_S i i_T pri uključenju motora industrijske vode 6 kV, 630 kW.



Slika 8. Prelazne struje i_R , i_S i i_T pri uključenju motora za čeličanu 6 kV, 500 kW

Pregledom i analizom rezultata istraživanja prelaznih faznih napona i prelaznih struja pri uključenju i isključenju šest visokonaponskih motora u mrežama 6 kV Sartid-a uočeno je sledeće:

- Uključenja visokonaponskih motora dovode do pojave faznih prenapona, ali ne viših od 2 r.j. Nije bilo prethodnih paljenja dielektričnog luka u prekidaču. Ukupan prenaponski proces se završava za nekoliko ms.
- Isključenja visokonaponskih motora po završetku procesa zaleta dovode do prenapona i iznad 2 r.j. Ovo je verovatno posledica sečenja struje pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu. Prenaponski proces traje najviše nekoliko ms.
- Isključenja visokonaponskih motora u toku procesa zaleta dovode do visokih prenapona. Najviši izmereni je 4,3 r.j. Prenaponski proces traje nekoliko ms.
- Struje uključenja visokonaponskih motora su velike. Kod nekih motora su i do petnaest puta veće od temene vrednosti struje u ustaljenom režimu rada. Relativno dugo zadržavaju visoke vrednosti dok traje zalet motora i onda vrlo brzo padaju na ustaljenu vrednost. Motor industrijske vode 630 kW više od 1 s povlači struju približno 5 do 6 puta veću od struje u ustaljenom režimu, motor recirkulacione pumpe 450 kW oko 0,8 s povlači struju približno 7 do 10 puta veću od struje u ustaljenom režimu, motor dimososa 850 kW više od 6 s povlači struju približno 9 puta veću od struje u ustaljenom režimu i motor pumpe industrijske vode br.1 800 kW više od 4 s povlači struju 5 do 6 puta veću od struje u ustaljenom režimu.
- U toku istraživanja se događalo da pri uključenju motora isti ispadne iz pogona delovanjem prekostrujne zaštite. Ovakve pojave nisu retke.

3. IZOLACIJA NAMOTAJA STATORA MOTORA

Podnosivi naponi izolacije za sklopne prenapone u mrežama 6 kV nisu poznati. Smatra se da ne bi trebalo da budu niži od $U_s = 0,9 U_{kpn}$, gde U_{kpn} predstavlja temenu vrednost kratkotrajnog podnosivog napona industrijske frekvencije. Za opremu u mreži 6 kV iznosi $U_{kpn} = 20\sqrt{2}kV \approx 28kV$. Prema tome u mreži 6 kV sklopni prenaponi do nivoa $U_s = 0,9 \cdot 28 = 25,2kV$, odnosno izraženi u relativnim jedinicama u odnosu na fazni napon $U_s = 4,3r.j.$ (najviši napon opreme u mreži 6 kV je 7,2 kV, a u skladu sa tim temena vrednost najvišeg faznog napona je $U_{F,6} = 7,2\sqrt{2} / \sqrt{3} = 5,9kV$), ne bi trebalo da predstavljaju opasnost za izolaciju mreže.

Visokonaponski motori domaće proizvodnje ispituju se u skladu sa tehničkom preporukom [2]. Prema njoj, ispitni kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije izolacije statora motora prema masi iznosi $U_{if} = (2U_n + 1) kV$, gde je U_n naznačeni napon motora. Na osnovu ovoga može se konstatovati da je podnosivi udarni napon izolacije namotaja statora prema masi za sklopne prenapone najmanje $\sqrt{2}U_{if} kV$. Za visokonaponske motore naznačenog napona 6 kV iznosi $U_{if} = 18,4 kV$ ili u relativnim jedinicama $U_{if} = 3,1 r.j.$.

Prema standardu IEC 34-15 podnosivi udarni napon izolacije namotaja statora visokonaponskog motora je:

$$U_p = (4U_n + 5) kV$$

gde je U_n naznačeni napon visokonaponskog motora izražen u kV_{eff} . Za motore 6 kV je $U_p=29$ kV, odnosno u relativnim jedinicama $U_p=4,9$ r.j..

Podaci o podnosivim udarnim naponima izolacije namotaja statora visokonaponskih motora u inostranoj literaturi su različiti. Najčešće se sreću podaci koje su prezentirale Radna grupa IEEE [3] i Radna grupa 13.02 CIGRE [4] i podaci istraživanja u okviru projekta EPRI [5]. Najniži podnosivi udarni naponi izolacije namotaja statora prema masi su prema predlogu Radne grupe IEEE i istovremeno predstavljaju donju granicu podnosivog napona u skladu sa predlogom Radne grupe 13.02 CIGRE:

$$U_p = 1,25\sqrt{2}(2U_n + 1) kV$$

gde je U_n naznačeni napon visokonaponskog motora izražen u kV_{eff} . Za motore 6 kV je $U_p=23$ kV, odnosno u relativnim jedinicama $U_p=3,9$ r.j..

Na osnovu napred izloženog, prenaponi koji se javljaju u mreži 6 kV pri uključenju i isključenju visokonaponskih motora u toku normalnog rada naprežu ali ne ugrožavaju izolaciju njihovih statora. Međutim, prenaponi koji se javljaju pri isključenju visokonaponskih motora u toku zaleta veoma mnogo naprežu izolaciju statora, kao i izolaciju opreme u ćeliji i izolaciju kablovskog voda preko koga se motor napaja. Ovakva isključenja motora treba svesti na minimum. Ona se dešavaju posle uključenja motora u slučajevima kada nisu ispunjeni svi uslovi za obavljanje tehnoloških procesa koje motor pokreće ili ako prekostrujna zaštita motora nije adekvatno podešena. Dakle, treba voditi računa da se pre uključenja visokonaponskog motora ispune svi uslovi za pokretanje tehnoloških procesa, ili što je još mnogo bolje, ako je izvodljivo, onemogućiti uključenja motora ako nisu ispunjeni svi uslovi za pokretanje tehnoloških procesa.

Prekostrujna zaštita motora mora se tako podesiti da je ne pobude visoke struje, koje traju u toku zaleta motora.

Na prenapone pri isključenju motora bitno utiče i tip prekidača. Istraživanja su pokazala da se viši prenaponi pri isključenju motora javljaju kada se koriste prekidači tipa B.

4. ZAKLJUČCI

Na osnovu analize rezultata istraživanja prelaznih faznih napona i prelaznih struja pri uključenju i isključenju visokonaponskih motora u mrežama 6 kV Sartid-a može se zaključiti sledeće:

- Prenaponi koji se javljaju pri uključenju visokonaponskih motora i isključenju u normalnom radu naprežu izolaciju motora. Ugroziti je mogu samo prenaponi koji nastaju pri isključenju u toku zaleta motora. Ovakva isključenja treba svesti na minimum ili onemogućiti.
- Struje uključenja visokonaponskih motora su veoma velike i dovode do značajnih dinamičkih pa i termičkih naprezanja namotaja statora i rotora. Poželjno ih je smanjiti.

LITERATURA

- [1] P. Vukelja, J. Mrvić, D. Hrvic i drugi, "Istraživanja prenapona i struja pri uključenju i isključenju visokonaponskih motora u mreži 6 kV Sartid-a", Elaborat broj 310309, Elektrotehnički institut "N.Tesla", Beograd 2003.god.

- [2] Tehnička preporuka TP-32 *Izolacioni sistemi rotacionih mašina,* ZEP, Beograd 1982.god.
- [3] IEE Working Group of progress report Impulse voltage strength of AC rotating machines, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No.18, August 1981.
- [4] Working Group 13.02 of Study Committee 13 Interruption of small inductive currents: Chapter 3, Part B, *Electra* 1984, No 95.
- [5] Gupta, B.K., Lloyd, B.A. Stone, G.C., Sharma, D.K., Nilsson, N.C., and Fitzgerald, J.P., "Turn insulation capability of large AC motors, Part 3 – Insulation co-ordination", *IEEE Trans.on Energy Conversion*, December 1987, EC-2 (4), pp. 674-678.
- [6] P. Vukelja, M. Savić, *Prenaponi na razvodima srednjeg napona za sopstvene potrebe termoelektrana, posebno na visokonaponskim motorima pri radu prekidača – I faza*, Studija br. 329001, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd 1990.
- [7] P. Vukelja i drugi, *Prenaponi na razvodima srednjeg napona za sopstvene potrebe termoelektrana, posebno na visokonaponskim motorima pri radu prekidača – II faza*, Studija br. 3219205, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 1992.

Abstract: This paper presents the results of experimental research on overvoltages and currents, while switching on and off high voltage motors in 6 kV networks of "Sartid". They were part of larger project of research on transient voltage and currents phenomena in 6 kV networks, financed by "Sartid" and Ministry of science, technology and development. The results of research have pointed out to the measures that have to be taken to increase reliability of high voltage motors in 6 kV industrial plants networks.

OVERVOLTAGES AND CURRENTS WHILE SWITCHING ON AND OFF HIGH VOLTAGE MOTORS IN 6 kV NETWORK OF "SARTID"

Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić, Ninoslav Simić