

PRENAPONI NA IZOLACIJI VISOKONAPONSKIH MOTORA

Mr. Petar Vukelja, Radomir Naumov, Mitko Vučinić, Jovan Mrvić
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beogradu, Koste Glavinića 8a

Sadržaj: Rad prikazuje rezultate eksperimentalnih istraživanja prenapona na izolaciji visokonaponskih motora pri njihovom uključanju, isključenju u toku normalnog rada i isključenju u toku zaleta, kao i pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja u mreži. Visokonaponski motori su uključivani i isključivani maloujnim prekidačima, sklopnim aparatima sa magnetnim oduvavanjem luka i vakuumskim sklopnim aparatima. Istraživanja su izvršena u kablovskim mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom napona 6 kV. To su mreže sopstvene potrošnje termoelektrana, industrijskih i drugih pogona. Na osnovu analize rezultata istraživanja predložene su mere za ograničenje prenapona, a time i za povećanje pouzdanosti rada visokonaponskih motora.

Cljučne reči: visokonaponski motor/prenapon/izolacija

1. UVOD

Proboji izolacije namotaja statora visokonaponskih motora prema masi u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom napona 6 kV upućivali su na neophodnost razmatranja, kako kvaliteta njihove izolacije, tako i prenaponskih pojava koje se na njoj javljaju. Istraživači iz Instituta "Nikola Tesla", pored teorijskih razmatranja i proračuna, izvršili su u određenom broju mreža i eksperimentalna istraživanja prenapona koji se javljaju na izolaciji namotaja statora 6 kV motora. U ovom radu su izloženi samo rezultati eksperimentalnih istraživanja prenapona pri radu sklopnih aparata visokonaponskih motora i pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja u mreži. Istraživanja prenapona su izvršena na izolaciji visokonaponskih motora u kablovskim mrežama sopstvene potrošnje termoelektrana (TENT A, TENT B, Kostolac B, TE-TO Zrenjanin, TE Kolubara), fabrike ("Birač" Zvornik), kombinata (MKS Smederevo), površinskih kopova (Kostolac B, "Suvodol" Bitola) itd. Istraživanja sklopnih prenapona su vršena pri uključanju visokonaponskih motora, pri isključenju u toku normalnog rada i pri isključenju u toku zaleta. Pri tome su snimani prelazni fazni naponi na ulazu u kablovski odvod motora. Na određenom broju visokonaponskih motora, tamo gde je to bilo moguće, izvršena su i snimanja prelaznih faznih napona na priključcima motora, kao i prelaznih napona na kontaktima sklopnog aparata sa kojim se komutiralo. Istraživanja prenapona pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja izvršena su uključanjem i isključenjem prekidača jednog od kablovskih odvoda na kome je već prethodno izveden spoj jedne od faza sa uzemljivačem. U određenom broju mreža izvođen je intermitirajući zemljospoj. Snimanja prelaznih napona su izvršena preko kapacitivnih naponskih mernih sistema, izrađenih u Institutu "Nikola Tesla", sa kapacitivnošću visokonaponskog dela delitelja napona 100-400pF i vremenom odziva $T < 200\text{ns}$. Za snimanje su korišćeni analogni i digitalni osciloskopi.

2. PRENAPONI PRI USPOSTAVLJANJU I PREKIDANJU ZEMLJOSPOJA

Pojava zemljospoja u mreži sa izolovanom neutralnom tačkom ne utiče na rad visokonaponskih motora. Zemljospoj se u većini mreža samo signalise i tek po utvrđivanju njegove lokacije, vodeći računa da se ne prekidaju započeti tehnološki procesi, isključuje.

Istraživanja prenapona pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja izvršena su u 10 mreža 6 kV. Izvođen je metalni i intermitirajući zemljospoj.

Metalni zemljospoj je izvođen na jednoj od faza izabranog kablovskog odvoda mreže njenim spajanjem sa uzemljivačem. Spajanje je izvođeno obično preko strujnog transformatora 12 kV, 60/5 A, ili direktno preko kratkih šinskih veza. Uspostavljanje i prekidanje metalnog zemljospoja je izdvojeno uključanjem i isključenjem prekidača kablovskog odvoda na kome je zemljospoj izveden. Broj ciklusa operacija prekidača uključanje-isključenje na metalni zemljospoj je iznosio najmanje 5 u istraživanoj sekciji mreža.

Intermitirajući zemljospoj je izvođen približavanjem i udaljavanjem uzemljenog metalnog dela pomoću motke za uzemljenje jednoj od faza mreže. Na dovoljno bliskom rastojanju javljao se električni luk, koji se udaljavanjem i približavanjem izolacione motke prekidao i ponovo uspostavljao. Pri izvođenju intermitirajućeg zemljospoja dolazilo je do više desetina pa i stotina uspostavljanja i prekidanja zemljospoja.

Pojava zemljospoja u izolovanoj mreži menja simetričan sistem faznih napona, dok sistem linijskih napona ostaje isti. Napon faze na kojoj je nastupio zemljospoj naglo pada na nulu, a naponi druge dve faze, posle oscilatornog prigušenog prenaponskog procesa, sa faznih napona prelaze na linijske napone. Prenaponi koji se pri ovom javljaju nisu izuzetno visoki. Definisani u relativnim jedinicama (p.u.), u odnosu na amplitudu faznog napona ustaljenog režima neposredno pre nastanka zemljospoja, nisu prelazili u mrežama 6 kV vrednosti 2.6 p.u. pri uspostavljanju metalnog zemljospoja i 2.8 p.u. pri intermitirajućem zemljospoju. Njihove frekvencije i srmine takođe nisu visoke. Pri uspostavljanju zemljospoja frekvencija njihovog oscilovanja se krće najviše do nekoliko kHz, dok pri prekidanju zemljospoja je obično ispod 50 Hz.

Prekidanjem zemljospoja u pojedinim istraživanim mrežama pojavljivale su se ferorezonansne oscilacije i to druga subharmonijska ferorezonansa sa prenaponima prema zemlji do 2.1 p.u. Ona može i da se trajno zadrži. Međufazni naponi na koje su priključeni visokonaponski motori u toku trajanja ferorezonanse ostaju nepromenjeni i motori normalno rade. Međutim, naponi prema zemlji su znatno viši od normalnih. Pored osnovnog harmonika (50Hz) oni sadrže istofazni veoma izražen drugi subharmonik (25 Hz) i harmonik nešto manje izražen ferorezonanse delova Hz do nekoliko Hz. Pojava ferorezonanse je nepoželjna u mreži. Efikasno se sprečava postavljanjem otpornika u otvoreni trougao sekundarnih namotaja garnitura naponskih transformatora u mreži. Otpornost otpornika treba da bude od 20-40Ω za mreže 6 kV.

Uključenja i isključenja visokonaponskih motora treba izbegavati u prisustvu zemljospoja u mreži, jer se mogu pojaviti visoki prenaponi na njihovoj izolaciji, znatno viši nego pri uspostavljanju i prekidanju zemljospoja.

3. PRENAPONI PRI UKLJUČENJU I ISKLJUČENJU SKLOPNIH APARATA VISOKONAPONSKIH MOTORA

Istraživanja sklopnih prenapona su izvršena na izolaciji 42 visokonaponska motora snage od 160 kW do 6.5 MW u deset mreža naponskog nivoa reda 6 kV [1, 2, 3]. To su bili: asinhroni motori sa kratkospojenim rotorom, asinhroni motori sa

namotanim rotorom ili sa prstenovima na rotoru i sinhroni motori. Snimani su prelazni naponi pri uključenju motora, pri isključenju u toku normalnog rada (obično su bili neopterećeni ili slabo opterećeni) i pri isključenju u zaletu. Isključenja u zaletu, odnosno isključenja neposredno posle uključenja motora, su moguća i dešavaju se u pogonu, najčešće usled dejstva zaštite, kada nisu ispunjeni potrebni tehnološki uslovi za obavljanje odgovarajućeg procesa.

Sklopni aparati sa kojima su vršena uključenja i isključenja motora su bili malouljni prekidači, sklopni aparati sa magnetnim oduvavanjem luka i vakuumski sklopni aparati.

Rezultati istraživanja su predstavljani u tabeli 1. U njoj su dati:

- snaga motora koji je uključivan i isključivan,
- vrsta sklopnog aparata sa kojim se komutiralo,
- dužina kabela,
- broj operacija sklopnih aparata motora: broj uključenja, broj isključenja u toku normalnog rada i broj isključenja u toku zaleta,
- maksimalna (u_{max}) vrednost prenapona trofaznog uzorka na ulazu u kablovski odvod motora definisana u reaktivnim jedinicama (p.u.) pri uključenju, isključenju u toku normalnog rada i isključenju u toku zaleta.

Prenaponski procesi, koji se javljaju pri uključenju i isključenju motora, pored karakteristika sistema napajanja (mreže) i kola koje se uključuje i isključuje (kabl-motor) bitno zavise od karakteristika sklopnog aparata. Idealan sklopni aparat sa aspekta prenapona je bez prethodnih paljenja električnog luka i ponovnih nastajanja električnog luka (ponovna paljenja i ponovni preskoci), a u procesu isključenja prekida struju pri njenom prolazu kroz prirodnu nulu (nema sećene struje). Međutim, idealnog sklopnog aparata nema, te su prethodno navedene pojave prisutne u većoj ili manjoj meri. To su pokazala eksperimentalna istraživanja prenapona izvršena u deset mreža pri uključenju i isključenju visokonaponskih motora sa različitim vrstama i tipovima sklopnih aparata.

3.1. Sklopne operacije malouljnim prekidačima

Malouljni prekidači sa kojima su uključivani i isključivani visokonaponski motori su bili stariji tipovi inostrane proizvodnje i jugoslovenske proizvodnje.

Uključivanja visokonaponskih motora malouljnim prekidačima nisu dovodila do veoma visokih prenapona; najviši izmereni prenapon od 180 izvedenih operacija uključenja ($180 \times 3 = 540$ članova trofaznog uzorka sklopnih prenapona) je bio 2.25 p.u.

Isključenja visokonaponskih motora u toku normalnog rada uglavnom nisu dovodila do visokih prenapona. Ako se izuzme motor 6 kV, 200 kW (tabela 1, redni broj 3) najviši izmereni prenapon od 87 operacija isključenja ($87 \times 3 = 261$ član uzorka) u toku normalnog rada je bio 1.80 p.u. Za napred navedeni motor maksimalni izmereni prenapon za istu operaciju je iznosio 2.60 p.u. i pretpostavlja se da je kod prekidača tog motora bila izraženija pojava sećenja struje.

Isključenja visokonaponskih motora u toku zaleta dovodila su uglavnom do visokih prenapona; najviši izmereni prenapon od 93 izvedene operacije isključenja u zaletu motora ($93 \times 3 = 279$ članova uzorka) je bio 4.65 p.u. Na sve tri faze se javljaju visoki prenaponi. Do ovako visokih prenapona dovode pojave sećenja struje pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu i ponovna paljenja električnog luka. Vremena čela prenapona su bila veća od 1 μ s. Uočeno je da se viši prenaponi javljaju pri isključenjima starijih tipova malouljnih prekidača.

3.2. Operacije sklopnim aparatima sa magnetnim oduvavanjem luka

Sklopni aparati sa magnetnim oduvavanjem luka, sa kojima su uključivani i isključivani visokonaponski motori, su bili kontaktori i prekidači inostrane proizvodnje.

Uključenja visokonaponskih motora sklopnim aparatima sa magnetnim oduvavanjem luka nisu dovodila do izuzetno visokih prenapona; najviši izmereni prenapon od 75 izvedenih operacija uključenja ($75 \times 3 = 225$ članova trofaznog uzorka sklopnih prenapona) je bio 2.55 p.u i to kada je slučajno uključen motor odmah po njegovom ispadu u zaletu; pri normalnim uključenjima najviši prenapon je bio 2.1 p.u.

Isključenja visokonaponskih motora u toku normalnog rada praktično su se odvijala bez prenapona; najviši izmereni prenapon od 36 izvedenih operacija isključenja ($36 \times 3 = 108$ članova uzorka) je bio 1.10 p.u.

Isključenja visokonaponskih motora u toku zaleta nisu dovodila do izuzetno visokih prenapona; najviši izmereni prenapon od 34 izvedene operacije isključenja ($34 \times 3 = 102$ člana uzorka) je bio 2.50 p.u.

3.3. Operacije vakuumskim sklopnim aparatima

Vakuumski sklopni aparati sa kojima su uključivani i isključivani visokonaponski motori su bili domaće i inostrane proizvodnje.

Uključenja visokonaponskih motora vakuumskim sklopnim aparatima nisu dovodila do izuzetno visokih prenapona; najviši izmereni prenapon od 208 izvedenih operacija uključenja ($208 \times 3 = 624$ člana uzorka) je bio 2.20 p.u. U toku uključenja je dolazilo do višestrukih prethodnih paljenja električnog luka u sve tri faze. Proces višestrukog paljenja i gašenja električnog luka između kontakta jednog pola sklopnog aparata traje u nekim slučajevima i duže od 1ms. Prenaponi koji pri tom nastaju izgledaju kao kolona više desetina sečenih naponskih talasa sa strminama sečenja koje mogu da dostignu i nekoliko desetina kV/ μ s. Vremena čela sečenih talasa su bila ispod 1 μ s, a njihove amplitude su retko prelazile vrednost 2.5 p.u. Pošto su snimani na ulazu u kablovski odvod motora, usled refleksije prenaponi mogu da budu znatno viši na ulazu u namotaj statora motora, jer je impedansa motora najmanje desetak i više puta veća od impedanse kabela.

Prisustvo kondenzatorskih baterija na ulazu u kablovske odvođe motora smanjuje broj prethodnih paljenja električnog luka i povećava vreme čela prenapona. To su pokazala istraživanja na dva motora (tabela 1, redni brojevi 32, 33, 38 i 39). Istraživanja su izvršena kada je na ulazu u kablovski odvod motora 260 kW i motora 750 MW bila priključena kondenzatorska baterija 3×60 kvar i kada je nije bilo. Vremena čela talasa koja su bez prisustva kondenzatorske baterije bila ispod 1 μ s su u njenom prisustvu povećana na najmanje 5 μ s.

Isključenja visokonaponskih motora u toku normalnog rada dešavala su se u najvećem broju slučajeva bez prenapona ili sa neznanim prenaponima; najviši izmereni prenapon od 148 izvedenih operacija isključenja ($148 \times 3 = 444$ člana uzorka) je bio 1.45 p.u.

Isključenja visokonaponskih motora u toku zaleta u najvećem broju slučajeva dešavala su se bez prenapona ili sa neznatnim prenaponima; najviši izmereni prenapon od 60 izvedenih operacija isključenja ($60 \times 3 = 180$ članova uzorka) je bio 1.85 p.u. Ponovnih paljenja luka koja se sreću pri ovim operacijama, odnosno pojave eskalacije napona [6] nije bilo.

3.4. Analiza prenapona na izolaciji namotaja motora pri sklopnim operacijama

Istraživanja prenapona pri uključanju i isključenju visokonaponskih motora 6 kV u deset istraživanih mreža su pokazala da se mogu pojaviti prenaponi koji znatno naprežu izolaciju namotaja statora. Mogu da budu veoma strmi sa vremenom čela znatno ispod 1 μ s i sa velikom amplitudom (maksimalno izmereno 4.65 p.u). Mereni su na ulazu u kablovske odvođe motora. Njihove amplitude mogu da budu veće na priključcima motora, ako su upadni talasi sa malim vremenima čela. U idealnom slučaju, kada je kabl bez dielektričnih gubitaka i kada su vremena čela kraća od vremena prostiranja talasa kroz kabl, amplitude napona na priključcima motora mogu da budu blizu dvostruke vrednosti upadnog talasa.

Prenaponi sa vremenima čela u nanosekundnom području neravnomerno se raspodeljuju u namotaju statora motora [6]. Znatno naprežu ulazne namotaje (sekcije) i zavojke. Kada je vreme čela prenapona ispod 100 ns na pojedinim zavojcima se može pojaviti napon koji iznosi nekoliko desetina procenata upadnog talasa, a na sekciji čak i veći od upadnog talasa. Smatra se da su prenaponi sa vremenom čela iznad 1 μ s uglavnom ravnomerno raspoređeni na međunavojnoj izolaciji namotaja statora.

Uključenja visokonaponskih motora sa sve tri vrste sklopnih aparata dovode do pojave prenapona. Kod malouljnih prekidača i sklopnih aparata sa magnetnim oduvavanjem luka se ne dešavaju prethodna paljenja električnog luka. Vakuumski sklopni aparati imaju višestruka prethodna paljenja električnog luka u svakoj fazi u procesu uključanja i pri svakom prethodnom paljenju nastaju prenaponi sa vremenima čela u nanosekundnom području. Njihov broj može da bude znatan po svakoj fazi (nekoliko desetina). Pitanje starenja izolacije usled ovakvih prenapona ostaje i dalje otvoreno, iako poslednja istraživanja [6] ukazuju da oni ne utiču na starenje izolacije.

Jedno od efikasnih sredstava za zaštitu međunavojne izolacije namotaja statora je priključenje kondenzatora (dovoljno je da budu reda 0.1-0.2 μ F iako neki idu i na 0.5 μ F) između faze i zemlje na ulazu u kablovski odvod motora, ili još efikasnije na priključke motora. To se može postići i sa R-C kolima (obično 100 Ω i 0.1-0.2 μ F). Vremena čela prenapona u nanosekundnom području priključenjem kondenzatora se produžuju na nekoliko μ s. Mora se naglasiti da se ovim rešenjem povećava struja zemljospoja u mreži, što nije povoljno za mreže sa izolovanom neutralnom tačkom koje već imaju znatnu struju zemljospoja. Efikasno sredstvo za ograničenje prenapona na međuzavojnoj izolaciji je i kondenzatorska baterija sa izolovanom neutralnom tačkom. Priključuje se na ulaz u kablovski odvod motora, ili, sa još efikasnijim dejstvom, na priključke motora. Ovo rešenje ne dovodi do povećanja struje zemljospoja, ali ima smisla ako je glavna (osnovna) uloga kondenzatorske baterije kompenzacija reaktivne energije.

Isključenja visokonaponskih motora u toku normalnog rada za sve tri vrste prekidača ne dovode do prenapona opasnih po izolaciju namotaja statora.

Isključenja visokonaponskih motora u zaletu malouljnim prekidačima dovode do znatnih prenapona. Malouljni prekidači seku struju pre njenog prirodnog prolaska kroz nulu, a dolazi i do ponovnih paljenja električnog luka. To je naročito izraženo kod starijih tipova malouljnih prekidača. Prenaponi koji pri tom nastaju imaju velike amplitude i znatnu energiju, te ozbiljno naprežu izolaciju namotaja statora prema masi. Ista isključenja vakuumskim sklopnim aparatima i sklopnim aparatima sa magnetnim oduvavanjem luka nisu dovodila do prenapona opasnih po izolaciju namotaja statora motora.

4. PODNOSIVI NAPONI IZOLACIJE NAMOTAJA STATORA VISOKONAPONSKIH MOTORA

Dielektrična čvrstoća izolacije namotaja statora za udarne napone je uglavnom nepoznata za visokonaponske motore koji se nalaze u istraživanim mrežama sopstvene potrošnje termoelektrana i industrijskih pogona. Visokonaponski motori domaće proizvodnje, koji su poslednjih nekoliko godina ušli u eksploataciju, ispitani su u skladu sa domaćim tehničkim preporukama TP-32 "Izolacioni sistemi rotacionih mašina" (1982), koje su jednim delom urađene na osnovu odgovarajućih propisa VDE i EDF. U preporuci TP-32 je ispitni kratkotrajni podnosivi napon industrijske frekvencije izolacije statora motora prema masi $U_{if} = (2U_n + 1)kV$, a između navojaka $U_{im} = 0,3U_n$, gde je U_n naznačeni napon motora. Na osnovu ovoga može se konstatovati da je podnosivi udarni napon izolacije namotaja statora prema masi viši od $\sqrt{2} U_{if}$, a međunavojne viši od $\sqrt{2} U_{im}$; za visokonaponske motore nazivnog napona 6 kV to iznosi $>18 kV_{tv}$, odnosno $>2.5 kV_{tv}$.

Podaci o podnosivim udarnim naponima izolacije namotaja statora visokonaponskih motora su različiti. U literaturi se najčešće navode podaci koje su prezentirale Radna grupa IEEE [4] i Radna grupa 13.02 CIGRE [5], zatim podaci istraživanja u okviru projekta EPRI [6] i podaci iz standarda IEC 34-15. 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:

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

gde je U_n naznačeni napon visokonaponskog motora izražen u kV_{avr} . (Za motore 6kV je $U_p \approx 4.7$ p.u).

Prema standardu IEC 34-15 podnosivi udarni napon izolacije namotaja statora prema masi je viši:

$$U_p = (4U_n + 5)kV_{tv},$$

gde je U_n naznačeni napon visokonaponskog motora izražen u kV_{avr} . (Za motore 6kV je $U_p \approx 5.9$ p.u).

Najveće razlike su u podnosivim udarnim naponima međunavojne izolacije. Najniže vrednosti su prema predlogu Radne grupe IEEE (npr. za talase vremena čela 0.1 μs podnosivi napon je 1.5 p.u), a najviše prema istraživanjima u okviru EPRI projekta (za talase vremena čela 0.1 μs podnosivi naponi su oko 5 p.u ili viši).

5. ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja prenapona na izolaciji namotaja statora 6 kV motora u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom može se zaključiti da prenaponi znatno naprežu njihovu izolaciju. U cilju sniženja prenapona i smanjenja naprezanja izolacije namotaja statora visokonaponskih motora predlaže se sledeće:

- Mesto zamljospoja u mreži je potrebno što pre pronaći i zemljospoj eliminisati. Broj operacija sklopnim aparatima visokonaponskih motora za vreme trajanja zemljospoja svesti na neophodni minimum.
- Postaviti otpornike 20 Ω na krajeve otvorenog trougla sekundarnih namotaja garnitura induktivnih naponskih transformatora na sabirnicama mreže i na sekundarnoj strani transformatora (u transformatorskom polju) koji napajaju mrežu, radi otklanjanja ferorezonansnih oscilacija.
- Izolaciju prema masi namotaja statora visokonaponskih motora, koji se često uključuju i isključuju starijim tipovima malouljnih prekidača, a imaju česte ispade u

Tabela 1: Karakteristike trofaznih uzoraka sklopnih prenapona na ulazu u kablovske odvođe 6 kV motora pri sklopnim operacijama malouljnih prekidača (M), prekidača (PM) i kontaktora (KM) sa magnetnim oduvavanjem luka i vakuumskih prekidača (VP) i kontaktora (VK)

Red br.	Motor 6 kV (kW)	Sklopni aparat	Dužina kabl. odvoda (m)	Maksimalna vrednost prenapona (U_{max}) trofaznog uzorka na ulazu u kablovski odvod 6 kV motora i broj sklopnih operacija (n)					
				Uključenje		Isključenje u toku normalnog rada		Isključenje u zaletu	
				n	U_{max} (p.u.)	n	U_{max} (p.u.)	n	U_{max} (p.u.)
1	160	M	30	8	2.10	6	1.50	2	2.75
2	170	M	50	12	1.35	6	1.80	6	4.65
3	200	M	50	9	1.30	6	2.60	3	3.45
4	220	M	80	9	2.25	6	1.80	3	4.45
5	350	M	100	10	1.70	7	1.60	3	3.25
6	500	M	75	10	1.90	3	1.30	7	2.25
7	630	M	70	5	1.90	2	1.15	3	2.50
8	800	M	150	9	1.70	3	1.00	6	2.85
9	1200	M	45	8	2.05	3	1.15	5	2.05
10	1200	M	40	7	1.80	3	1.15	4	1.60
11	1250	M	60	6	1.62	3	1.00	3	1.25
12	1350	M	350	10	1.45	4	1.45	6	1.70
13	1350	M	350	8	1.40	3	1.15	5	1.80
14	1500	M	60	4	1.25	2	1.15	2	2.50
15	1500	M	70	8	1.90	3	1.45	5	2.30
16	2100	M	80	8	2.10	2	1.00	6	1.80
17	2700	M	120	8	1.65	4	1.05	4	1.48
18	2700	M	130	7	1.25	3	1.05	4	2.15
19	3150	M	60	11	2.10	6	1.00	5	2.00
20	6300	M	50	7	1.78	4	1.20	3	2.70
21	6300	M	45	6	1.90	3	1.05	3	2.10
22	6500	M	25	8	2.25	5	1.25	3	2.90
23	2000	M	50					2	2.10
24	200	KM	35	9	1.35	6	1.10	3	1.60
25	200	KM	20	11	1.50	8	1.00	3	1.75
26	200	KM	170	10	1.75	4	1.00	6	1.60
27	250	KM	100	10	1.35	7	1.10	3	1.60
28	500	KM	100	7	2.55	4	1.00	3	2.20
29	630	PM	150	9	1.80	4	1.00	5	2.50
30	2000	PM	120	10	2.10	3	1.00	7	2.25
31	2350	PM	30	9	1.95	5	1.00	4	1.55
32	260	VK	40	28	1.35	20	1.45	8	1.00
33*	260	VK	40	13	1.76	9	1.00	4	1.00
34	350	VK	100	18	1.50	12	1.25	6	1.00
35	500	VK	70	17	2.20	11	1.00	6	1.85
36	2x250	VK	70	14	1.50	10	1.00	4	1.00
37	2x315	VK	20	11	2.05	5	1.00	6	1.00
38	750	VK	50	25	1.55	24	1.00		
39*	750	VK	50	17	1.84	17	1.00		
40	800	VK	15	11	2.10	7	1.00	4	1.00
41*	900	VK	40	11	1.55	4	1.00	7	1.00
42	2x500	VK	80	9	1.60	6	1.00	3	1.00
43	2x630	VK	10	12	1.65	9	1.00	3	1.00
44	2000	VP	50	22	1.75	14	1.40	8	1.75

*Na ulazu u kablovski odvod motora postavljena kondenzatorska baterija 3x60 kvar

zaletu motora, poželjno je štititi od prenapona odvodnicima prenapona (sa ili bez iskrišta) postavljenim između faze i zemlje. Postavili bi se na ulaz kablovskog odvoda motora ili još bolje, ako je to izvodljivo, na priključke motora. Poželjno je da karakteristike odvodnika budu takve da ograničavaju prenapone na nivo reda 18 kV_{iv}.

- Zaštita izolacije namotaja statora visokonaponskih motora koji se uključuju i isključuju sklopnim aparatima sa magnetnim oduvanjem luka, sa kojima su izvršena istraživanja, nije neophodna.
- Izolaciju namotaja statora novih visokonaponskih motora, koji se uključuju i isključuju vakuumskim sklopnim aparatima, sa kojima su izvršena istraživanja, nije neophodno štititi, ako je izvršena njena kvalitetna kontrola kod proizvođača, osim ako to sam proizvođač ne zahteva. Za starije motore, koji se već duže vreme nalaze u eksploataciji i čiji se postojeći sklopni aparat zamenjuje vakuumskim, poželjno je konsultovati proizvođača motora o eventualnoj zaštiti njihove izolacije.
- U novim ili revitalizovanim mrežama poželjno je za visokonaponske motore izabrati sklopne aparate bez prethodnih i ponovnih paljenja električnog luka i bez pojave sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu. Takođe je poželjno izbor prekidača obaviti uz konsultacije sa proizvođačima motora i sklopnih aparata.

LITERATURA

- [1] P. Vukelja, Prenaponi na razvodima srednjeg napona za sopstvene potrebe termoelektrana, posebno na visokonaponskim motorima pri radu prekidača - II faza *Studija br. 329205*, Institut "N.Tesla", Beograd 1992.
- [2] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, P. Budišin, Prenaponi na izolaciji visokonaponskih motora pri sklopnim operacijama. *"Elektroprivreda" br. 7-9*, 1992, pp. 291-304.
- [3] P. Vukelja, R. Naumov, M. Vučinić, P. Budišin, Experimental investigations of high-voltage motor switching surges *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 142, No.3, May 1995.
- [4] IEEE Working Group progress report, Impulse voltage strength of AC rotating machines, *IEEE Trans.*, August 1981, PAS-100, (8), pp. 4041-4053.
- [5] Working Group 13.02 of Study Committee 13, Interruption of small inductive currents: *Chapter 3, Part B Electra*, 1984, (95), pp. 31-45.
- [6] GUPTA, B. K., NILSSON, N. E., SHARMA, D. K., Protection of motors against high voltage switching surges, *IEEE Trans.*, March 1992, EC-7, (1), pp. 139-147.

Abstract: The paper presents the results of experimental investigations of surges appearing on the insulation of high-voltage motors for normal switching operations and during an aborted start, as well as during the appearance and interruption of an earth fault in the network. High-voltage motors were switched by oil-minimum circuit breakers, air magnetic and vacuum switching devices. Investigations were performed mostly on 6 kV isolated neutral station service cable networks of thermal power plants, industrial or similar installations. On the basis of the results certain measures are proposed for limiting transients, thereby increasing the reliability of high-voltage motor operation.

OVERVOLTAGES ON THE INSULATION OF HIGH-VOLTAGE MOTORS

Petar Vukelja, Radomir Naumov, Mítko Vučinić, Jovan Mrvić