



DOI: 10.46793/CIGRE36.2071B

Д1 03

POBOLJŠANJE KARAKTERISTIKA IZOLACIONOG SISTEMA STATORA VISOKONAPONSKIH ASINHRONIH MAŠINA

**DRAGAN BRAJOVIĆ *, BOJAN JOKANOVIĆ, MILAN BEBIĆ, NENAD
KARTALOVIĆ, DUŠAN NIKEZIĆ**

FTN Čačak, EI Nikola Tesla, ETF Beograd, Institut Vinča

ČAČAK, BEOGRAD

SRBIJA

Kratak sadržaj — Cilj rada je da se pokažu mogući načini poboljšanja karakteristika izolacionog sistema statora koji će obezbediti jednostavan, pouzdan i znatan produžetak radnog veka visokonaponske asinhronne mašine. Da bi se postigli ti ciljevi koncentrisalo se na ostvarenje dugoročnije i stabilnije izolacije statorskog paketa asinhronne mašine bez promene gabarita same mašine. Dugovečnija i stabilnija izolacija statorskog izolacionog sistema je postignuta pojačanjem slabih mesta na njenim prefabrikovanim namotajima. Sa tako pojačanim slabim mestima na osnovama prefabrikovanih modela oni su izrađivani klasičnim postupkom uz primenu standardizovanih alata. Za praćenje efekata poboljšanja izolacionih karakteristika izolacionog sistema statora, izrađen je algoritam zasnovan na zakonu verovatnoće porasta i određivanja krivih veka trajanja. Krive veka trajanja određivane su metodom rastućeg napona uz svodenje dobijenih rezultata na odgovarajuće rezultate koji bi se dobili metodom konstantnog napona. Primljeni algoritam, formiran za potrebu ovoga rada je verifikovan sa velikom, 95%, statističkom pouzdanošću. Kombinovana merna nesigurnost mernog postupka je bila oko 5%.

Ključne reči — Asinhrona mašina – Kriva veka trajanja – Starenje izolacije statora.

* Svetog Save 65; 32102 Čačak; e-mail: dragan.brajovic@ftn.kg.ac.rs

1 UVOD

Predmet ispitivanja ovoga rada vezan je, uglavnom, za starenje visokonaponskih asinhronih mašina i mogućnost produženja njihovog veka trajanja. Namotaji statora i rotora su izrađeni ili od lakirane žice (niskonaponske asinhronne mašine) ili od prefabrikovanih namotaja (visokonaponske asinhronne mašine). Starenje visokonaponskih asinhronih mašina obično se odvija u izolacionom sistemu statora [1, 2] što dovodi, po pravilu, do njihovog ispadanja iz pogona. Prema podacima iz literature, i prema iskustvu remontnih radionica, preko 50 procenata ispada iz rada visokonaponskih asinhronih mašina dogodi se usled neplaniranog skraćanja veka trajanja izolacije prefabrikovanih namotaja statora visokonaponske asinhronne mašine [3-5]. Takvi događaji su veoma nepovoljni za korisnika. Veoma često neplaniran ispad iz rada visokonaponske asinhronne mašine može izazvati štetu koja višestruko nadmašuje vrednost same mašine [6, 7], a može dovesti i do katastrofalnih posledica (na primer kada je visokonaponska asinhronna mašina deo sistema upravljanja nuklearnog reaktora [8-10]). Imajući sve to u vidu, cilj ovoga rada je da se razmotre tehničko-tehnološki postupci za produženje veka trajanja izolacionog sistema statora visokonaponskih asinhronih mašina. Takav cilj se svodi na poboljšanje izolacionih karakteristika prefabrikovanih namotaja statora.

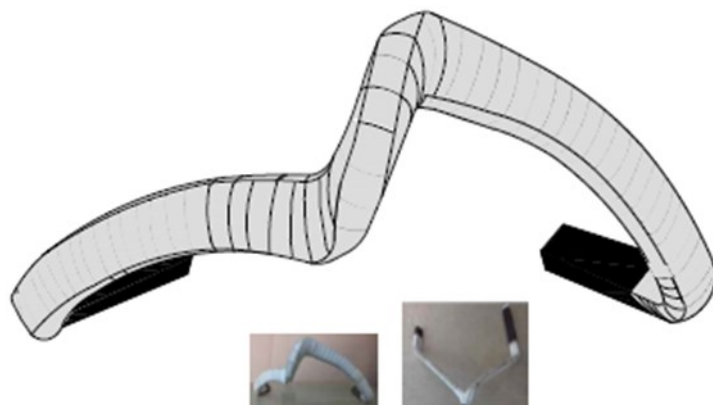
2 PROIZVODNJA PREFABRIKOVANIH NAMOTAJA

Prefabrikovani namotaji kao samostalne komponente statorskog namotaja mogu biti različitog oblika, pri čemu su im osnovne karakteristike i tehnološki postupak izrade veoma slični. U eksperimentalnom delu ovoga rada koristiće se prefabrikovani namotaji prikazani na slici 1 (prilikom montiranja u statorski lim paket). Oblik prefabrikovanog namotaja prikazanog na slici 1 je veoma čest tip prefabrikovanih namotaja u inženjerskoj praksi [11-13]. Kako osobine prefabrikovanog namotaja i njihove promene tokom eksploatacije asinhronne mašine dominantno zavise od tehnološkog postupka njihove izrade i primenjivanih materijala, potrebno je za razmatranje mogućnosti produžetka njihovog veka trajanja razmatrati poboljšanja postupka njihove izrade (koji se u praksi odvija automatski), a ne primenom novih materijala pošto je njihovo dugovremensko ponašanje nedovoljno poznato [14, 15].



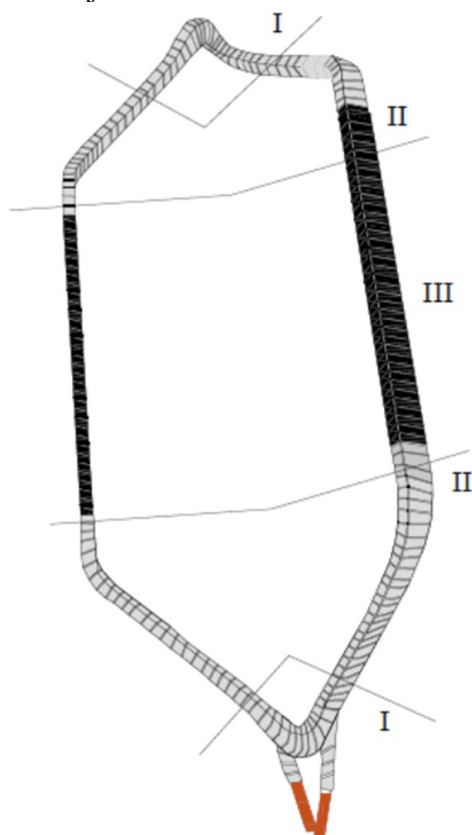
Slika 1. Prefabrikovani namotaj visokonaponske asinhronne mašine prilikom montiranja u statorski paket

Na slici 2 su prikazane glave prefabrikovanog namotaja na kome se vide crtež i dve fotografije ovog dela (glava prefabrikovanog dela visokonaponske asinhronne mašine je pretrpela dvostruki i jednostruki napon na uvrtnje).



Slika 2. Crteži glava prefabrikovanih namotaja i njihove fotografije

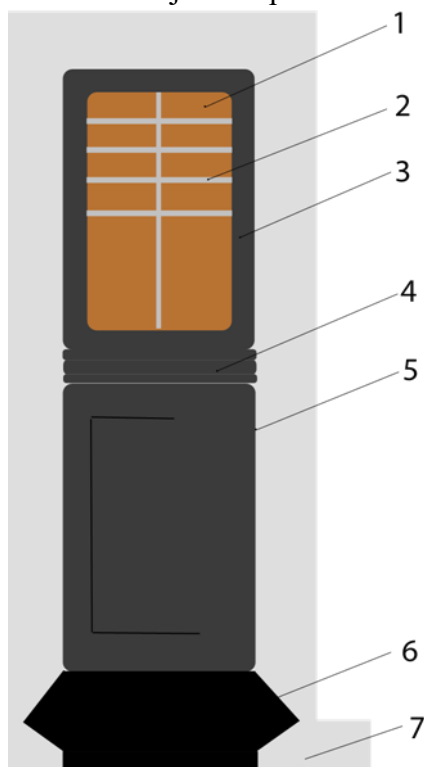
Glava prefabrikovanog namotaja se izoluje trakom koja je ili porozna ili impregnisana smolom (najčešće je u upotrebi traka od liskuna). Veoma je bitno da glava namotaja bude kompaktna pošto se tako postiže otpornost na vlagu i mehanička naprezanja. Posle tako dobijenog prefabrikovanog namotaja on se još jednom izoluje i dobija se konačni oblik, slika 3. Na slici 3 su rimskim brojevima I, II i III označeni delovi koji su prilikom formiranja prefabrikovanog namotaja trpeli napon uvrtanja (I, II) i koji nisu (III). Delovi prefabrikovanog namotaja koji nisu tokom konačnog formiranja oblika trpeli napon uvrtanja nazivaju se linearni delovi (I), a delovi koji su tokom konačnog formiranja trpeli napon uvrtanja nazivaju se glavom prefabrikovanog namotaja.



Slika 3. Crtež poprečnog preseka linearnog dela prefabrikovanog namotaja

Nakon izolacije glavnom izolacijom i izolacije glave namotaja na prefabrikovani namotaj se nanosi poluprovodni sloj. Poluprovodni sloj na površini prefabrikovanog namotaja služi za

izjednačavanje potencijala i da se izbegne parcijalno pražnjenje pri električnom polju iznad 2 kV/mm [16-18]. Na slici 4 je prikazan presek linearnog dela prefabrikovanog namotaja izolovan glavnom izolacijom i smešten u žljeb lim paketa statora.



Slika 4. Presek linearnog dela prefabrikovanog namotaja smeštenog u žljeb paketa statora: 1 – Provodnik, 2 – Izolacija provodnika, 3 – Izolacija namotaja, 4 – Međuslojna izolacija, 5 – Poluprovodnički sloj, 6 – Potporna letva, 7 – Dinamo lim

Za ispunjavanje vazdušnog prostora između prefabrikovanog namotaja (tj. glavne izolacije) i žljeba lim paketa statora služi impregnaciono sredstvo. Impregnaciono sredstvo je, najčešće, impregnaciona smola pošto ne sadrži rastavljачe kao lakovi. Glava prefabrikovanog namotaja se impregniše pa se sa kompletnim namotajem peče u cilju polimerizacije.

3 EKSPERIMENT

Razna vrsta naprezanja (termička, mehanička, vlaga) i njima izazvano starenje prefabrikovanih namotaja visokonaponske asinhronne mašine je ravnomerno raspoređeno po svim namotajima iz razloga simetrije [19, 20]. To znači da je ispitivanje jednog namotaja sa aspekta parametara koji utiču na starenje odgovaralo, po zakonu porasta verovatnoće, starenju sistema izolacionog sistema statora [21, 22].

Parametri koji (ako se izuzmu efekti standardne eksploatacije i ambijentalni uslovi) utiču na starenje namotaja su parcijalno pražnjenje i proticanje struje u fazi sa naponom (izraženo tangensom ugla gubitaka). Naponsko definitivno starenje, tj. kraj veka trajanja namotaja, završava njegovim probojem. Ali ispitivanje starenja preko probojnog napona je ekonomski neisplativo, a može se potpuno zameniti ispitivanjem praga parcijalnog pražnjenja pošto između te dve veličine postoji jednoznačna linearna fizička relacija, izražena veličinom koja se zove koeficijent proporcionalnosti [23].

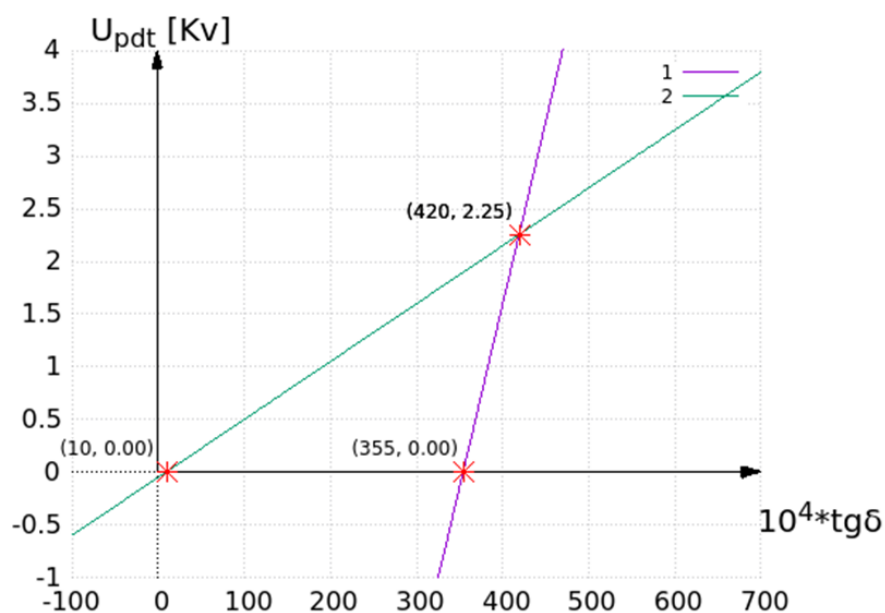
Ideja eksperimentalnog postupka je bila da se na uočenim slabim izolacionim mestima komercijalnih prefabrikovanih namotaja izvrše određene, ne velike, dopune pa da se time

njihov vek trajanja produži. Pored komercijalnih namotaja na raspolaganju za eksperimente su stajale i sve komponente od kojih se pravi namotaj, a i svi neophodni aparati za izradu prefabrikovanih namotaja. Na bazi tako raspoloživih komponenata i aparata proizvodili su se prefabrikovani namotaji istog oblika kao namotaja na slici 3 (u količini od 100 komada) uz određene izmene od kojih se, na bazi prethodnih ispitivanja, očekivalo da mogu produžiti vek trajanja prefabrikovanog namotaja, a time i visokonaponske asinhronne mašine.

Važno je naglasiti da je nakon izvršenih izmena u postupku izrade komercijalnih tehnoloških prefabrikovanih namotaja postupak za dobijanje poboljšanog prototipa, komercijalnog prefabrikovanog namotaja, nastavljen standardnim postupkom. Takođe treba pomenuti da su promene vršene za formiranje prototipa 1, 2 i 3 bile aditivne, tj. prototip 2 je sadržao i promene izvedene na prototipu 1, a prototip 3 je sadržao i promene koje su izvedene na prototipima 1 i 2. Pri tome su korišćeni, ne samo identični tehnološki postupci nego i isti izolacioni i provodni materijali. Ovo je bitno istaći pošto hemijska industrija nudi nove materijale koji imaju, prema rezultatima laboratorijskih ispitivanja za ovu primenu, bolje osobine, ali sa kojima se nema iskustvo u dugotrajnom režimu rada, za šta se visokonaponske asinhronne mašine proizvode.

Za merenje praga parcijalnog pražnjenja, probojnog napona i tangensa ugla gubitaka korišćen je profesionalni instrument B2HV, opremljen odgovarajućim softverima za navedena merenja. Merenje je vršeno pri frekvenciji 0,1 Hz iz sledećih razloga: 1-merni sistem je praktičniji za mobilnu dijagnostiku; 2-na frekvenciji 0,1 Hz parcijalna pražnjenja i probojni napon se mere jednostavnije i 3-merenje sa frekvencijom 0,1 Hz sprečava da na uređaju koji se testira dođe do bilo kojih reverzibilnih ili ireverzibilnih promena tokom testiranja [24]. Tokom merenja napona praga parcijalnog pražnjenja i probojnog napona korišćen je standard IEC 60270, a tangensa ugla gubitaka korišćen je standard DIN VDE 0276. Tokom merenja parcijalnog pražnjenja i probojnog napona i tangensa ugla gubitaka merni instrumenti su se nalazili u kabini zaštite 100 dB. Kabina je bila galvanski odvojena od ostatka mernog sistema. Merenja su vršena pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Kombinovana merna nesigurnost postupka bila je manja od 5% [25-28].

Da slučajne veličine napona praga parcijalnog pražnjenja i uređen par (probojni napon, probojno vreme) omogućavaju određivanje krive veka trajanja izolacije, a ne tangens ugla gubitaka, dokazuje da je dobijeni koeficijent korelacije između statističkih uzoraka od 100 slučajnih veličina napona praga parcijalnog pražnjenja i tangensa ugla gubitaka 0,27, a između statističkih uzoraka od 100 slučajnih veličina probojni napon i tangensa ugla gubitaka bio je još manji, naime iznosio je 0,23. Pored male vrednosti koeficijenta korelacije isti zaključak potvrđuju i regresivne prave dobijene na osnovu navedenih eksperimentalnih statističkih uzoraka slika 5.

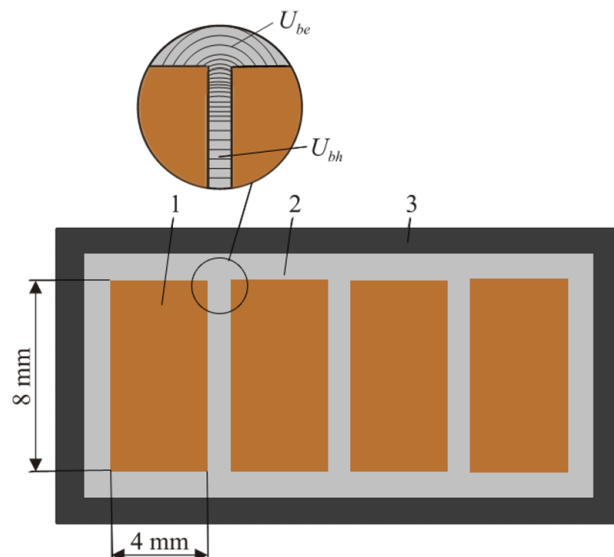


Slika 5. Regresione prave dobijene za statističke uzorke od po 100 slučajnih promjenljivih napon praga parcijalnog pražnjenja i tangens ugla gubitaka; 1 – Zavisnost regresione prave napona praga parcijalnog pražnjenja od tangensa ugla gubitaka; 2 – Zavisnost regresione prave tangensa ugla gubitaka od napona proboja parcijalnog pražnjenja.

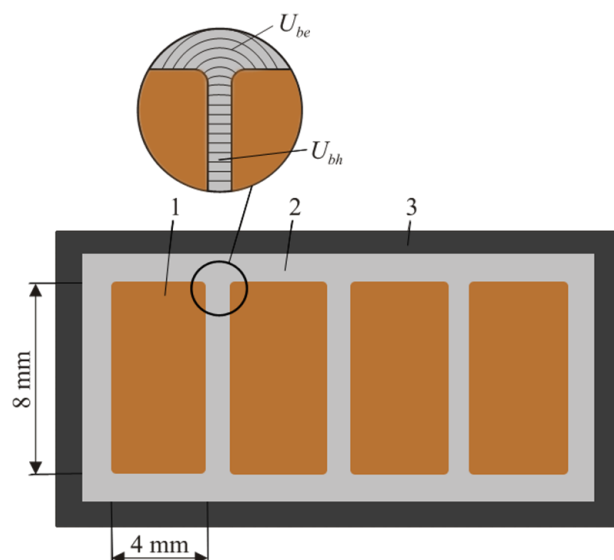
Eksperimentalno dobijeni rezultati su tretirani na sledeći način: 1-odbacivanje sumnjivih rezultata Šoveneovim kriterijumom, 2-testiranje rezultata dobijenih za jedan statistički uzorak su testirani na pripadnost jedinstvenom uzorku primenom U-testa, 3-primenom grafičkog, χ^2 -testa i testa Kolmogorova je testirana pripadnost slučajnih promjenljivih svakog statističkog uzorka Normalnoj raspodeli, Vejbulovoj raspodeli, eksponencijalnoj raspodeli, duploeksponencijalnoj raspodeli. Raspodela koja je određena kao najverovatnija (tj. imala najmanju statističku nesigurnost), određeni su parametri momentnom metodom i metodom najveće verodostojnosti. Ovde treba naglasiti da su izabrane raspodele za testiranje (osim Normalne raspodele) raspodele ekstremnih veličina i da su kao takve izabrane zbog prirode ispitivane veličine. Naime oštećenje izolacije predstavlja ekstremno slabo mesto i po toj logici slučajna promjenljiva vezana za slabljenje izolacije pripada ekstremnim slučajnim promjenljivim. Ovaj stav je potvrđen činjenicom da su sve izmerene slučajne veličine pripadale Vejbulovoj raspodeli (koja je osnova svih ostalih raspodela ekstremnih vrednosti).

4 REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 6 je prikazan presek namotaja sa izdvojenim delom oblasti ivica provodnika. U izdvojenom delu je metodom simulacije naelektrisanja izračunato (i nacrtano) električno polje[29, 30]. Sa slike 6 se vidi da oštre ivice provodnika znatno povećavaju vrednost električnog polja u izolatoru između provodnika što može dovesti do ranije i intenzivnije pojave parcijalnog pražnjenja. Iz toga razloga su ivice provodnika prototipa zaobljene, slika 7.

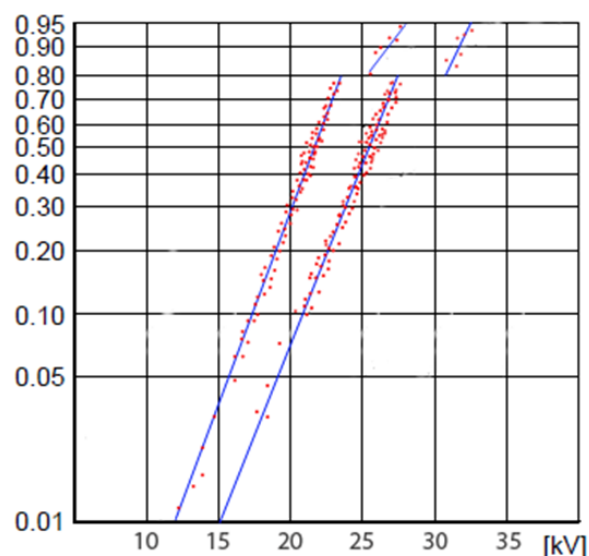


Slika 6. Poprečni presek linearnog dela prefabrikovanog namotaja visokonaponske asinhronne mašine sa izdvojenim delom uz ivicu provodnika (u kome je metodom simulacije naelektrisanja izračunato, i prema standardu nacrtano električno polje između dva provodnika); 1 - Provodnik, 2 – Lak-staklo-staklo-lak izolacija, 3 – Spoljna izolacija.



Slika 7. Poprečni presek linearnog dela namotaja prototipa 1 sa izdvojenim delom uz zaobljenih ivica provodnika (u kome je metodom simulacije naelektrisanja izračunato, i prema standardu nacrtano električno polje između dva provodnika); 1 - Provodnik, 2 – Lak-staklo-staklo-lak izolacija, 3 – Spoljna izolacija

Prototip prefabrikovanog namotaja sa zaobljenim ivicama je završen standardnim postupkom i nazvan prototip 1. U daljem postupku su relevantne osobine prototipa 1, sa aspekta starenja, poređene sa prefabrikovanim komercijalnim namotajem. Na slici 8 su prikazane kumulativne krive statističkog uzorka od 100 slučajnih promenljivi probojni napon za komercijalni prefabrikovani namotaj i za prototip sa zaobljenim ivicama, tj. prototip 1, na Vejbulovom papiru verovatnoće. Kumulativna kriva prikazana na slici 8, i za komercijalni prefabrikovani namotaj i za prototip 1 spadaju u složene verovatnoće aditivnog tipa.

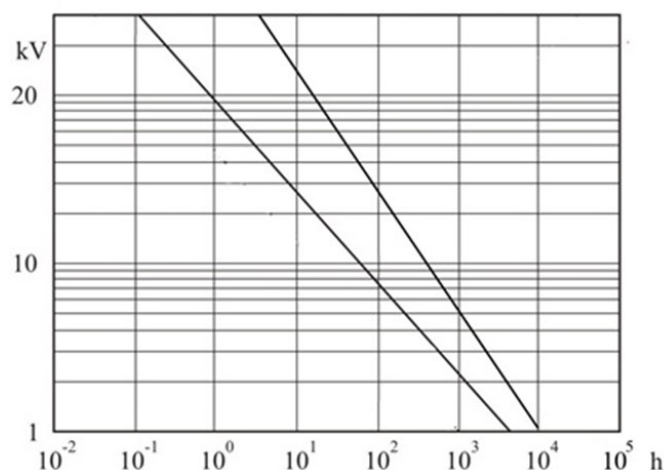


Slika 8. Kumulativna kriva statističkog uzorka od po 100 slučajnih promenljivih probojni napon za komercijalni prefabrikovani namotaj i prototi 1.

Tabela 1: Rezultati dobijeni posmatranjem termičke slike i istovremenim merenjem graničnog napona parcijalnog pražnjenja komercijalno prefabrikovanog namotaja

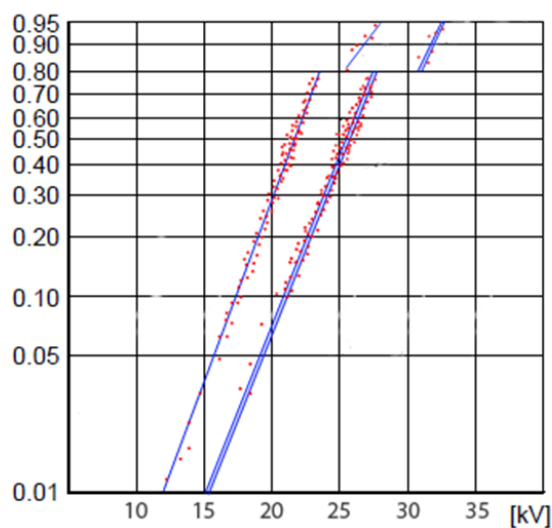
Oblast	I	II	III
Pojava delimičnog pražnjenja	50	40	10
Vrednost graničnog napona parcijalnog pražnjenja	1.4 – 2.4 kV	1.6 – 2.4 kV	25 – 30 kV

Složena verovatnoća sa slike 8 se sastoji iz dve Vejbulove verovatnoće (ili čak tri, ako se kumulativne prave razmatraju sa izuzetno malom statističkom nepouzdanosti). Ovaj rezultat se lako da objasniti na osnovu tabele 1 na kojoj su prikazane oblasti pojave praga pražnjenja. Ogroman broj pojava praga proboja se javlja u oblasti glave prototipa 1 i taj broj se razlikuje za manje od 10% u odnosu na komercijalni prefabrikovani namotaj. Na osnovu toga se može zaključiti da pojava praga parcijalnog pražnjenja potiče u glavi namotaja usled oštećenja međuizolacije tehnološkim postupkom izrade, a ne usled oštih ivica provodnika. Oštre ivice provodnika utiču na vrednost napona praga parcijalnog pražnjenja namotaja, ali u svim njegovim oblastima ravnopravno (misli se na oblasti I, II, III). Ovo tumačenje nedvosmisleno potvrđuju rezultati dati u tabeli 1 dobijeni lociranjem mesta pojave praga parcijalnog pražnjenja. Osnovni rezultat ovoga dela eksperimenta je da se na slici 8 uočava značajno povećanje (oko 20%) probojni napon za prototip 1. Ova promena dovodi do produžetka krive veka trajanja dobijene metodom merenja rastućim naponom svedenim na metodu merenja konstantnim naponom za oko 17%, slika 9.



Slika 9. Krive veka trajanja za komercijalni prefabrikovani namotaj i prototip 1

Nastavak unapređenja prototipa 1 prefabrikovanog namotaja je bilo dvostruko izolovanje provodnika zaobljenih ivica lak-staklo-staklo-lak izolacijom (u cilju smanjenja parcijalnog pražnjenja), tj. formiranja prototipa 2. Nakon formiranja prefabrikovanog namotaja 2 snimljen je novi statistički uzorak od 100 slučajnih promenljivih probojni napon. Sličan nivo povećanja je dobijen i prilikom određivanja statističkog uzorka vrednost praga parcijalnog pražnjenja za prototip 2 u odnosu na prototip1. Na slici 10 su prikazane kumulativne krive statističkih uzoraka slučajnih promenljivih probojni napon komercijalni prefabrikovani namotaj i, prototip 1 i prototip 2 na Vejbulovom papiru verovatnoće.

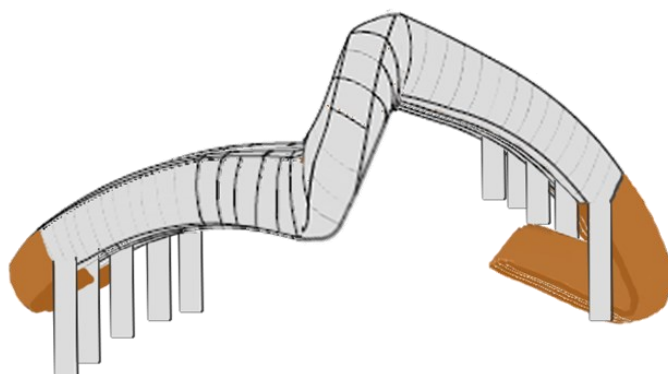


Slika 10. Kumulativna kriva statističkog uzorka od po 100 slučajnih promenljivih probojni napon za komercijalni prefabrikovani namotaj, prototip 1 i prototip 2.

Sa slike 10 se uočava da je dupliranje lak-staklo-staklo-lak međunavojne izolacije za samo oko 2% povećalo vrednost probojnog napona. Na osnovu ovoga rezultata se može zaključiti da pojačanje lak-staklo-staklo-lak izolacije ne doprinosi značajno produženju veka trajanja prefabrikovanog namotaja. Produženje veka trajanja prototipa 2 u odnosu na prototip 1 je bilo u granicama kombinovane merne nesigurnosti.

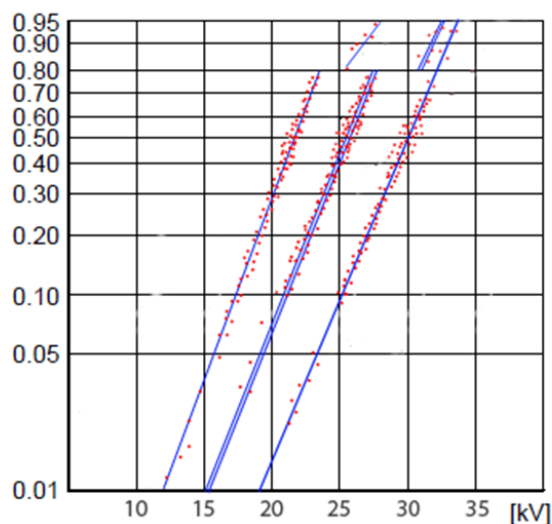
Pošto se glava prefabrikovanog namotaja nalazi izvan žljebova statorskog paketa gde trpi

značajna mehanička naprezanja usled oscilacija (a u praksi i značajna ambijentalna naprezanja) u cilju produžetka veka trajanja je posebna pažnja posvećena izolaciji glave namotaja. To je bilo posebno i iz razloga što tokom tehnološkog postupka glava namotaja trpi dvostruki i jednostruki napon na uvijanje. Tom prilikom se lak-staklo-staklo-lak izolacija tanji, a može i da pukne, kao što je već rečeno. Iz toga razloga je napravljen i prototip 3 kod kojeg su dopune i poboljšanje izolacije bile usmerene na izolaciju glave namotaja. Prvo je provodnik, u oblasti u kojoj će se formirati glave prototipa 3 upetostručen (provodnicima čija je debljina iznosila 0,1% od debljine glavnog provodnika i koji su dosegali do linearnog dela (oblast III) glavnog provodnika gde je ostvarivan i električni kontakt finim hard letovanjem bez prelazne otpornosti. Svaki je izolovan dvostrukom lak-staklo-staklo-lak izolacijom iste debljine kao i već korišćena lak- staklo-staklo -lak izolacija, slika 11.



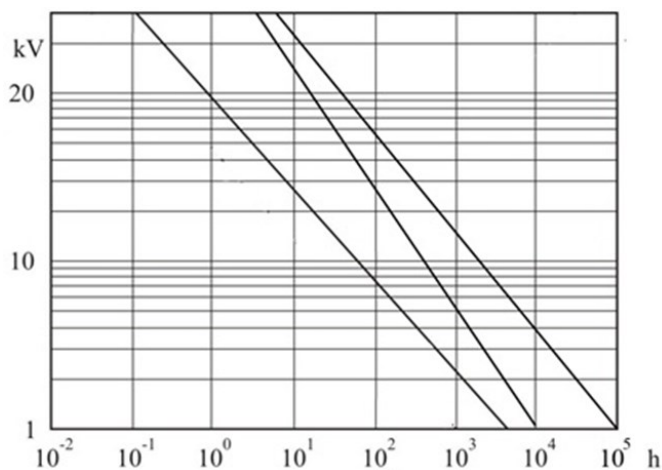
Slika 11. Modifikovana struktura glave namotaja prototip 3.

Nakon toga je provodnik presovan. Naravno ova operacija je vršena u oblasti I i II provodnika i nije bila jednostavna za izvođenje u uslovima u kojima je vršena. Tehnološki postupak je nastavljen standardno. Nakon dobijanja konačnog oblika je glava prototipa 3 dodatno izolovana poroznom trakom od prirodnih vlakana i liskuna impregnisana smolom i dodatno izložena visokoj temperaturi u cilju polimerizacije smole. Nakon toga je prototip 3 finalizovan standardnim postupkom. Sa prototipom 3 je izvršeno merenje 100 slučajnih promenljivih probojni napon (metodom rastućeg napona uz svođenje rezultata na rezultate koji bi se dobili metodom konstantnog napona). Na slici 12 su prikazane kumulativne krive statističkog uzorka slučajne promenljive probojni napon za komercijalni, prefabrikovani namotaj, prototip 1, prototip 2 i prototip 3 na Vejbulovom papiru verovatnoće.



Slika 12. Kumulativna kriva statističkog uzorka od po 100 slučajnih promenljivih probojni napon za komercijalni prefabrikovani namotaj i prototipi 1, 2 i 3.

Sa slike 12 se vidi da prototip 3 ima višu vrednost probojnog napona za oko 35% u odnosu na komercijalni prefabrikovani namotaj. Taj rezultat se može objasniti činjenicom da kumulativna raspodela slučajne veličine probojni napon nije više kombinovana aditivnog tipa. Naime dorade na glavi prototipa približno su izjednačili napon praga parcijalnog pražnjenja, (a samim tim i probojni napon) u oblasti I, II, i III. To je ujedno u osnovi izjednačilo vrednost probojnog napona duž čitavog prototipa i poništila sva slaba mesta izolacije glave prototipa 3. Na slici 13 je prikazana kriva veka trajanja za prototip 3. Sa slike 13 se vidi da prototip 3 ima oko 35% duži vek trajanja od komercijalnog prefabrikovanog namotaja. Treba napomenuti da se ovaj odnos veka trajanja komercijalnog prefabrikovanog namotaja i prototipa 3 povećao za nekoliko procenata (u korist prototipa 3) nakon što su zajedno proveli 250 sati izloženi standardnim oscilacijama frekvencije 100 Hz, što, u slučajevima prototipova 1 i 2, nije bio slučaj.



Slika 13. Krive veka trajanja za komercijalni prefabrikovani namotaj i prototip 1, 2 i 3.

5 ZAKLJUČAK

Dobijeni rezultati pokazuju i da su najslabije oblasti prefabrikovanog namotaja statora njegovi krajevi, tj. obe glave namotaja (na slici 3 označene sa I i II). Do toga dolazi što se samim tehnološkim postupkom u ovim oblastima vrši uvijanje i oštećuje izolacija, a električno polje između provodnika prestaje biti homogeno. Pored toga pošto se glava prefabrikovanog namotaja nalazi izvan žljebova statorskog paketa izloženija je mehaničkim i ambijentalnim naprezanjima. Generalni zaključak bi, svakako bio, da bi boljom konstrukcijom i izolacijom glave namotaja, kako je urađeno na prototipu 3 (li slično tome), statorskih prefabrikovanih namotaja bilo moguće znatno povećati vek trajanja visokonaponskih asinhronih mašina. Pri tome je važno naglasiti da unesene promene pri izradi prototipa nije došlo ni do najmanje promene u mehanizmu starenja dobijenih prototipova u odnosu na komercijalni prefabrikovani namotaj, što se zaključuje na osnovu linearnosti krivih veka trajanja za komercijalni prefabrikovani namotaj i sve ispitivane prototipove. Ovakva pojava produžetka ostatka veka trajanja se može objasniti na dva načina: 1 – dodavanje petostruke, tanje provodne trake iste širine izolovane lak-staklo-staklo-lak izolacijom iste dimenzije kao međuslojna izolacija i koja je spojena sa vrhom glave namotaja i linearnim delom (deo 1), na osnovu Kirhovog zakona smanjuje struju i trakama glave namotaja, a time i skin efekat što sprečava termičko oštećenje izolacione trake svih provodnika, i 2- dodati petostruki sloj tanke provodne trake i takođe elastične lak-staklo-staklo-lak izolacije čini glavu znatno elastičnom i otpornijom na mehaničke i oscilatorne pojave. Sinergija tih efekata poboljšava električne i mehaničke karakteristike prototipa i dobija se uočeni efekat.

7 LITERATURA

- [1] L. Vereb, P. Osmokrović, M. Vujisić, Z. Lazarević, N. Kartalović, “Effect of insulation construction bending on stator winding failure,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 14 (5), pp. 1302-1307, 2007.
- [2] L. Veréb, P. Osmokrović, M. Vujisić, Č. Dolićanin, K. Stanković, “Prospects of constructing 20 kV asynchronous motors,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16 (1), art. no. 4784574, pp. 251-256, 2009.
- [3] T. Nedić, Dj. Lazarević, K. Stanković, N. Kartalović, “Optimization of Fast Three-Electrode Spark Gaps Isolated with a SF6 and He Mixture,” Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 36, Issue 3, Pages: 234-242, 2021.
- [4] N. Kartalović, S. B. Djekić, S. D. Djekić, D. Nikezić, and U. Ramadani, “Possibility of Application Nuclear Magnetic Resonance for Measurement of Fluid-Flow,” Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 36, Issue 2, Pages: 168-173, 2021.
- [5] F. Zec, N. Kartalović, T. Stojić, “Prediction of high-voltage asynchronous machines stators insulation status applying law on increasing probability,” International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 116, art. no. 105524, 2020.
- [6] https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_5307/objava_22856/fajlovi/AsinhronMasine.pdf
- [7] https://www.lhm.co.za/products/stator_coils/45.html
- [8] D. Arbutina, A. Vasić-Milovanović, T. Nedić, A. Janićijević, and Lj. Timotijević, “Possibility of Achieving an Acceptable Response Rate of Gas-Filled Surge Arresters

- by Substitution of Alpha Radiation Sources by Selection of Electrode Material and the Electrode Surface Topography,” Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 35, Issue 3, Pages: 223-234, 2020.
- [9] T. Nedić, A. Janićijević, K. Stanković, and N. Kartalović, “Efficient Replacement of the Radioactive Sources in the Gas-Filled Surge Arresters Construction for the Insulation Co-ordination at the Low Voltage Level,” Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 35, Issue 2, Pages: 130-137, 2020.
 - [10] P. Osmokrović, I. Krivokapić, D. Matijašević, N. Kartalović, “Stability of the gas filled surge arresters characteristics under service conditions,” IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 11, Issue 1, Pages: 260 – 266, 1996.
 - [11] <https://www.indiamart.com/proddetail/hydro-generator-stator-rewinding-21127495962.html>
 - [12] J. F. Gieras, *Advancements in Electric Machines*, Springer Netherlands, 2008. ISBN 9781402090066
 - [13] *Induction Motors*. electricmotors.machinedesign.com. Penton Media, Inc. Archived from the original on 2007-11-16.
 - [14] S. Hammoud and M. Abbas, “Analytical Method for Calculating the Efficiencies of a Randomly Located Point Source and an Ovoid Shape Detector,” Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 35, Issue 2, Pages: 109-120, 2020.
 - [15] N. Stanojević, J. Đokić, D. Nikezić, and P. Osmokrović, “Application of complex statistical distributions and natural isotopes of hydrogen and oxygen for assessment of water origin in Šar Mountains aquatorium,” Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 35, Issue 2, Pages: 172-180, 2020.
 - [16] P. Osmokrovic, M. Stojanovic, B. Loncar, N. Kartalovic, I. Krivokapic, “Radioactive resistance of elements for over-voltage protection of low-voltage systems,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 140, Issue 1-2, Pages: 143 – 151, April 1998.
 - [17] P. Osmokrovic, B. Loncar, R. Sasic, “Influence of the electrode parameters on pulse shape characteristic of gas-filled surge arresters at small pressure and inter-electrode gap values,” IEEE Transactions on Plasma Science, Volume 33, Issue 5 II, Pages: 1729 – 1735, October 2005.
 - [18] W. Mosch, “Elektrische Isolierungen unter dem Einfluß von Konstruktion und Technologie,” *Elektrie*, 33 (12), pp. 623-625, 1979.
 - [19] A. Hughes, B. Drury, *Electric Motors and Drives, - Fundamentals, Types and Applications*, 4th Edition, Elsevier Ltd., 2013. ISBN 978-0-08-098332-5
 - [20] W. Tong, *Mechanical Design of Electric Motors*, CRC Press, 2017. ISBN 9781138072213
 - [21] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, 2nd Edition Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-58157-5

- [22] L. Vereb, N. Kartalović, P. Osmokrović, “The Influence of the State of Inter-Winding Insulation on the Tendency of Normal Voltage Increase in High Voltage Asynchronous Machines,” 9th international symposium on high voltage engineering, Austria, 1995.
- [23] I. Jeftenić, N. Kartalović, D. Brajović, B. Lončar, “Aging of stator coil interconductor insulation of high voltage asynchronous motor,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25 (1), pp. 352-359, 2018.
- [24] S. Nandi, H. A. Toliyat, L. Xiaodong, “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, 2005.
- [25] V. Antić, “Semi-automatic Positioning of the Protective Screen Based on Integration with C-arm X-ray Device,” Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 36, Issue 1, Pages: 85-90, 2021.
- [26] S. Djekić, D. Nikezić, D. Brajović, N. Kartalović, and U. Ramadani, “Passive and Active Shielding Against Electromagnetic Radiation,” Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 35, Issue 4, Pages: 331-338, 2020.
- [27] M. Pejović, E. Živanović, and Č. Belić, “The Possibility for Gamma and UV Radiation Detection Based on Electrical Breakdown Time Delay Measurement in Krypton and Xenon Filled Diodes,” Nuclear Technology and Radiation Protection, Volume 36, Issue 3, Pages: 243-248, 2021.
- [28] W. Hauschild, R. Köppe, “Statistische Auswertung hochspannungstechnischer Messungen am Digitalrechner,” ELTRA - Fortschrittsbericht, IPH Berlin, 1973.
- [29] P. Osmokrovic, D. Kusic, N. Arsic, Z. Lazarevic, “Numerical and experimental design of three-electrode spark gap for synthetic test circuits,” IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 9, Issue 3, Pages: 1444 – 1450, July 1994.
- [30] P. Osmokrovic, M. Vujisic, K. Stankovic, A. Vasic, B. Loncar, “Mechanism of electrical breakdown of gases for pressures from 10^{-9} to 1 bar and inter-electrode gaps from 0.1 to 0.5 mm,” Plasma Sources Science and Technology, Volume 16, Issue 3, Pages: 643 – 6551, August 2007.

IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF THE STATOR INSULATION SYSTEM OF HIGH VOLTAGE ASYNCHRONOUS MACHINES

DRAGAN BRAJOVIĆ, BOJAN JOKANOVIĆ, MILAN BEBIĆ, NENAD
KARTALOVIĆ, DUŠAN NIKEZIĆ

FTN Čačak, EI Nikola Tesla, ETF Belgrade, Institute Vinča

ČAČAK, BELGRADE

SERBIA

Abstract— The aim of the study is to show possible ways of improving the characteristics of the stator insulation system, which will ensure a simple, reliable and significant extension of the operating life of the high-voltage asynchronous machine. In order to achieve these goals, the focus was on achieving longer-term and more stable isolation of the stator package of the asynchronous machine without changing the dimensions of the machine itself. Longer-lasting and more stable insulation of the stator insulation system is achieved by strengthening the weak points on its prefabricated windings. With such reinforced weak points on the basis of prefabricated models, they were made using the classic process with the use of standardized tools. To monitor the effects of improving the insulation characteristics of the stator insulation system, an algorithm was developed based on the law of probability of growth and determination of the life curves. Lifetime curves were determined using the increasing voltage method while reducing the obtained results to the corresponding results that would be obtained using the constant voltage method. The applied algorithm, formed for the purpose of this study, was verified with a high statistical reliability of 95%. The combined measurement uncertainty of the measurement procedure was about 5%.

Key words — Asynchronous machine – Life curve – Aging of stator insulation.

POBOLJŠANJE KARAKTERISTIKA IZOLACIONOG SISTEMA STATORA VISOKONAPONSKIH ASINHRONIH MAŠINA

IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF THE STATOR INSULATION SYSTEM OF HIGH VOLTAGE ASYNCHRONOUS MACHINES

**DRAGAN BRAJOVIĆ, BOJAN JOKANOVIĆ, MILAN BEBIĆ, NENAD
KARTALOVIĆ, DUŠAN NIKEZIĆ**

FTN Čačak, EI Nikola Tesla, ETF Beograd, Institut Vinča

ČAČAK, BEOGRAD

SRBIJA

Kratak sadržaj - Cilj rada je da se pokažu mogući načini poboljšanja karakteristika izolacionog sistema statora koji će obezbediti jednostavan, pouzdan i znatan produžetak radnog veka visokonaponske asinhronne mašine. Da bi se postigli ti ciljevi koncentrisalo se na ostvarenje dugoročnije i stabilnije izolacije statorskog paketa asinhronne mašine bez promene gabarita same mašine. Dugovečnija i stabilnija izolacija statorskog izolacionog sistema je postignuta pojačanjem slabih mesta na njenim prefabrikovanim namotajima. Sa tako pojačanim slabim mestima na osnovama prefabrikovanih modela oni su izrađivani klasičnim postupkom uz primenu standardizovanih alata. Za praćenje efekata poboljšanja izolacionih karakteristika izolacionog sistema statora, izrađen je algoritam zasnovan na zakonu verovatnoće porasta i određivanja krivih veka trajanja. Krive veka trajanja određivane su metodom rastućeg napona uz svodenje dobijenih rezultata na odgovarajuće rezultate koji bi se dobili metodom konstantnog napona. Korišćen je metod eksperimentalnog određivanja statističkog uzorka slučajne promenljive uređen par (probojni napon, probojno vreme), metodom rastućeg napona. To je rađeno iz čisto praktičnog razloga i ako se bilo svesno da je u ovom cilju metod konstantnog napona superiorniji (naravno naučni razlozi bi bili, teoretski gledano, apsolutno zadovoljeni da je merenje vršeno metodom konstantnog napona, ali takav eksperiment bi trajao više desetina godina i , što je najgore, ne bi dao tačne rezultate iz razloga prirodnog starenja mernih uzoraka čime bi došlo do sinergije dva mehanizma starenja). Istim postupkom su vršena i merenja vrednosti napona praga parcijalnog pražnjenja. Primenjeni algoritam, formiran za potrebu ovoga rada je verifikovan sa velikom, 95%, statističkom pouzdanošću. Kombinovana merna nesigurnost mernog postupka je bila oko 5%. Kao interesantan rezultat ovoga rada je svako isključenje slučajne promenljive tangens ugla gubitaka kao moguće slučajne veličine za određivanje krive veka trajanja prefabrikovanog namotaja, a i bilo koje čvrste izolacije uopšte.

Ključne reči – Asinhrona mašina – Kriva veka trajanja – Starenje izolacije statora.