

Primena EDA metodologije u cilju sagledavanja stanja izolacionog sistema obrtnih mašina

Denis Ilić^{1,2}, Radmila Partonjić^{1,2}, Momčilo Milić^{1,2}, Đorđe Jovanović¹,
Ljubiša Nikolić¹

¹ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

² Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73,
11000 Beograd, Srbija
denis.ilic@ieent.org

Kratak sadržaj: Izolacioni sistemi snažnijih obrtnih mašina se već dugi niz godina podrobnije ispituju metodama koje su konstantno unapređivane i potvrđene. Mašine manjih snaga i, uslovno rečeno, manjeg značaja, kao što su visokonaponski motori, su često održavani minimalnim sredstvima i neretko ne podležu ozbiljnijim električnim ispitivanjima. Uvođenjem EDA (Electronic Dielectric Analyzer) metodologije u praksu stvaraju se uslovi za pouzdanu i potpuniju dijagnostiku stanja statorskih namotaja velikih mašina, kao i brz, jednostavan i jeftin „*screening*“ velikog broja mašina manjih snaga kao što su visokonaponski motori. U radu će biti prikazana EDA metodologija i mogućnosti koje pruža, kao i mogućnosti softverskog i hardverskog rešenja.

Ključne reči: ispitivanje obrtnih mašina, EDA metodologija, dijagnostika stanja, „*screening*“.

1. Uvod

Pouzdana i kvalitetno napajanje električnom energijom ima veliki uticaj u pravilnom funkcionisanju modernog društva. U lancu proizvodnje i prenosa električne energije do krajnjeg potrošača obrtne mašine i transformatori predstavljaju osnovne činioce kojima se poklanja neophodna posebna pažnja prilikom održavanja. Trend prelaska na održavanje prema stanju uslovio je razvoj mernih i dijagnostičkih metoda kojima bi se pouzdano utvrdilo stanje postojeće opreme, te stoga planirale blagovremene intervencije i eventualne zamene defektne opreme rezervnom. Obrtnim mašinama kao neizostavnim u procesu proizvodnje električne energije se poklanja posebna pažnja pri analizi njihovog stanja. Veće i snažnije obrtne mašine uglavnom imaju dodatno instalirane i neke oblike kontinualnog monitoringa pojedinih parametara i

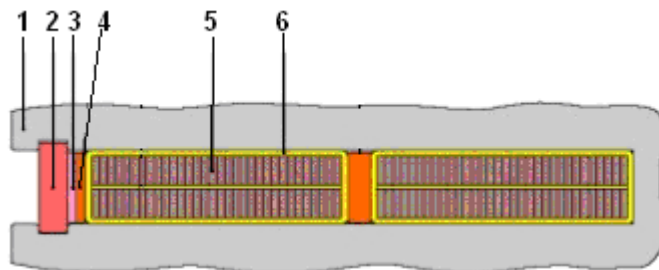
podvrgavaju se studioznijim i složenijim ispitivanjima tokom predviđenih godišnjih remonta, prema standardima predviđenoj dinamici i obimu. Neretko se mašine manjih snaga, kojih ima u velikom broju, održavaju samo u osnovnom obimu [1-6]. Na primer, u termoelektrani Nikola Tesla A u Obrenovcu, u pogonu je više od 134 visokonaponska motora, instalisane snage preko 220MW, na koje se oslanja gotovo kompletna sopstvena potrošnja elektrane. Kompleksna i redovna periodična ispitivanja ovako velikog broja VN motora postaju praktično nemoguća sa stanovišta obima, potrebnog vremena, neophodne opreme, ali i nesrazmerno visoke cene.

Stoga su se električna ispitivanja uobičajeno svodila na obavezno jednom minutno ispitivanje merenjem električne otpornosti izolacije namotaja statora VN motora, često zajedno sa pripadajućim napojnim kablom, pre njegovog ponovnog uključjenja. Motori bi se servisirali u slučaju defekta i njihovog iznenadnog ispada.

Firma „Unitronics“ iz Španije, u saradnji sa energetsom kućom „Iberdola“, je u poslednjih dvadesetak godina razvijala metodologiju za efikasno, brzo i jeftino ispitivanje električnog izolacionog sistema statorskih namotaja obrtnih mašina i ubrzo ga uvrstila u njihov primarni set ispitivanja. EDA sistem je u stanju da za relativno kratko vreme prikupi dovoljno podataka o izolacionom sistemu statora i da automatski indicira potencijalne probleme kao što su površinska i unutrašnja kontaminacija, ovlaženost, ubrzano starenje i degradacija dielektrika. Na osnovu rezultata dobijenih EDA metodologijom mogu se odabrati dodatne metode naknadnog ispitivanja, ukoliko su potrebne, kojima bi se videla „šira slika“ stanja izolacionog sistema [7 – 9].

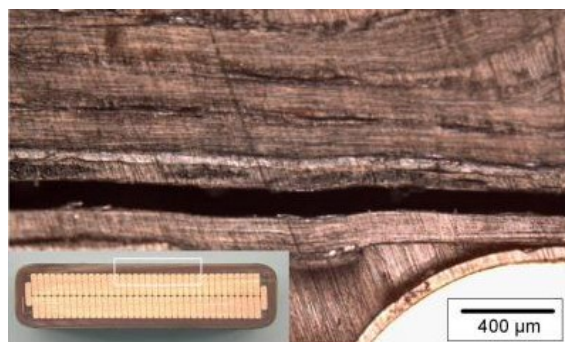
2. Priroda defekata u izolacionom sistemu obrtnih mašina

Statorski namotaj obrtnih mašina je sačinjen od polunavojaka ili štapova, uklinjenih u žlebove magnetskog kola statora (Slika 1). Mehanički, čine prilično složenu i kompaktnu strukturu sa obezbeđenim predefinisanim tolerancijama u pogledu predviđene termičke dilatacije bakarnog provodnika tokom vremena [10, 11].



Slika 1. Izgled jednog polunavojka u žlebu magnetskog jezgra statora: 1 –magnetsko jezgro statora, 2, 3, 4 – trake i klinovi za učvršćenje polunavojka u žlebu, 5 – provodnik, 6 – izolacioni materijal

Osnovna izolacija statorskih polunavojaka je bazirana na liskunu i vezivnom sredstvu, najčešće u vidu smole. Ranije, kao vezivna sredstva korišćeni su uglavnom bitumen i šelak. Moderni elektroizolacioni sistemi obrtnih mašina gotovo isključivo koriste veziva na bazi sintetičkih smola, koji su termički daleko stabilniji, te dopuštaju više radne temperature namotaja. Uglavnom su svi noviji izolacioni sistemi izrađeni u termičkoj klasi F, koja izdržava temperature i do 155°C. Najnoviji silikonski elastomeri dopuštaju radne temperature i do 180°C. Tokom radnog veka električni izolacioni sistem obrtnih mašina je izložen sadejstvu takozvanih TEAM faktora, koji predstavljaju sintezu termičkih, električnih, ambijentalnih i mehaničkih naprezanja. Pored toga, neizbežni nedostaci koji se javljaju prilikom izrade statorskog namotaja predstavljaju potencijalna slaba mesta koja mogu dodatno da se razvijaju [11]. Temperaturne varijacije, elektromehanička naprezanja i sl. mogu dovesti do razvoja šupljina unutar izolacionog materijala ili delaminacije, tj. odvajanja izolacije (Slika 2).



Slika 2. a) Mikrofotografija delaminirane izolacije tokom testa ubrzanog starenja sa više termičkih ciklusa i b) Primer kontaminacije namotaja statora u zoni glave namotaja

Ovako nastale šupljine su potencijalna slaba mesta u izolacionom sistemu sa tendencijom pogoršanja i progresije. Kao posledica svega

prethodno navedenog dolazi do slabljenja sveopštih karakteristika izolacionog materijala, odnosno do starenja izolacije. Kako bi se blagovremeno planirali neophodni servisni zahvati, i po mogućnosti predupredili neželjeni ispadi i kvarovi, periodičnim ispitivanjem nastoji se pratiti trend pogoršanja stanja EIS namotaja pogodnim ispitnim metodama. Koje ispitne metode odabrati je poseban zadatak, vrlo često uslovljen i ograničen vremenskim intervalom u kome je moguće raspolagati mašinom u cilju ispitivanja.

3. Metodologija EDA testa

Procena opšteg stanja izolacionog sistema električne obrtne mašine je izuzetno komplikovana i zahtevna procedura. Kada se u obzir uzmu raznovrsni materijali primenjeni u izradi električnih mašina, te raznoliki eksploatacioni uslovi u kojima se motor može naći, problem procene stanja EIS postaje veoma ozbiljan. EDA test predstavlja sofisticiranu metodu ispitivanja izolacionog sistema statorskog namotaja pri visokom jednosmernom naponu.

3.1. Dielektrici u polju jednosmernog napona

Izlaganjem izolacije statorskog namotaja jednosmernom naponu dolazi do polarizacionih procesa unutar dielektrika. U trenutku uspostavljanja jednosmernog napona u dielektriku se uspostavlja trenutna kapacitivna struja (Slika 3). Ova kapacitivna struja je kratkotrajna i relativno brzo, po eksponencijalnom zakonu, opada na nulu. Nakon toga, ukupnu struju kroz dielektrik čine:

- apsorpciona komponenta – koja je obrnuto proporcionalna vremenu,

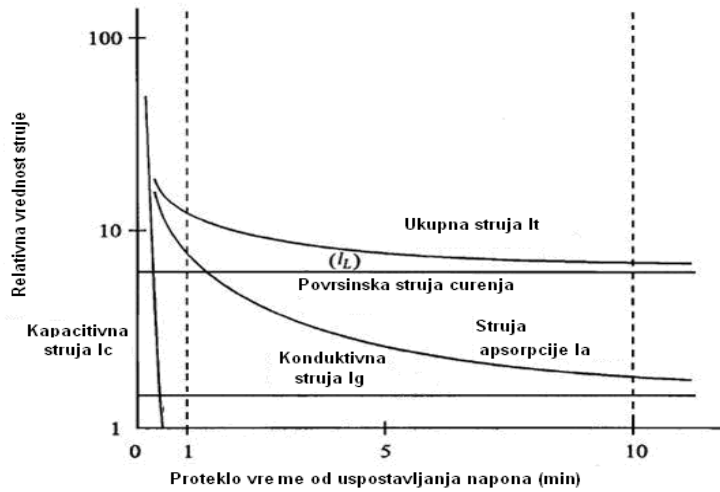
$$I_A = K \cdot t^{-n}$$

gde su K i n koeficijenti koji zavise od primenjenog ispitnog napona i karakteristika izolacionog sistema. Ova komponenta ima vremensku konstantu reda 10 minuta.

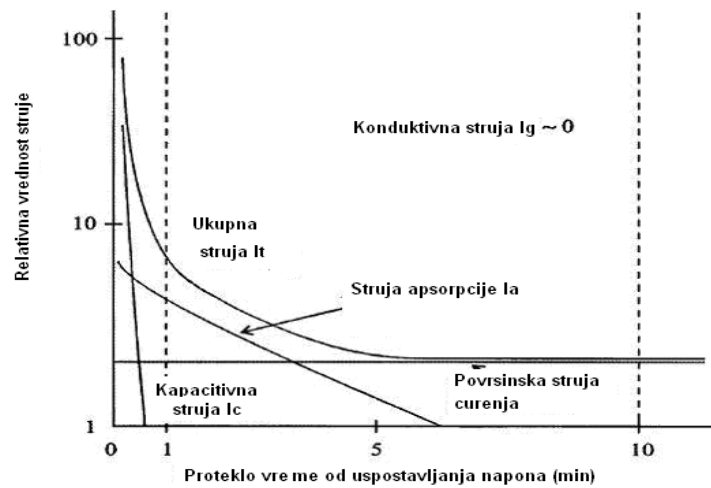
- površinske struje curenja I_L – koje su posledica površinske kontaminacije namotaja.
- konduktivna komponenta I_G – struja koja prolazi kroz zapreminu dielektrika i posledica je neizbežnih nesavršenosti izolacionih materijala.

Odnosi otpornosti izolacije pri 60s i 15s, odnosno 10min i 60s, predstavljaju indekse polarizacije, odnosno apsorpcije, respektivno [12, 13].

Različiti tipovi izolacionih materijala se različito ponašaju pri izlaganju visokom jednosmernom naponu. Na slikama 3, odnosno 4, prikazane su tipične struje kroz izolacione materijale na bazi liskuna i asfalta (klasa B), kao i novije izolacione materijale na bazi liskuna impregniranog smolom (klasa F).



Slika 3. Tipična promena struje kroz izolaciju termičke klase B



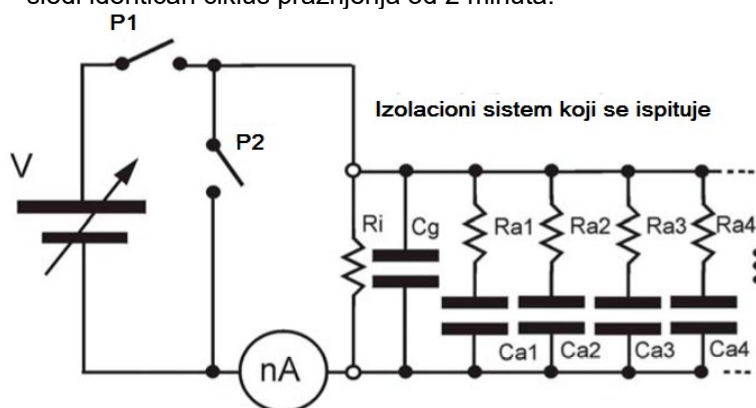
Slika 4. Tipična promena struje kroz izolaciju termičke klase F

3.2. EDA test sistem

EDA merni sistem je razvijen kao kompleksni test statorskog namotaja obrtne mašine, implementiran tako da se vrlo jednostavno i brzo može izvršiti i na osnovu testa doneti preliminarni zaključak o stanju EIS statora obrtne mašine.

EDA test je nedestruktivna, off-line test metoda visokim jednosmernim naponom koja sakuplja podatke o globalnom stanju izolacionog sistema statorskog namotaja obrtne mašine [7,8]. Procedura testa se sastoji od:

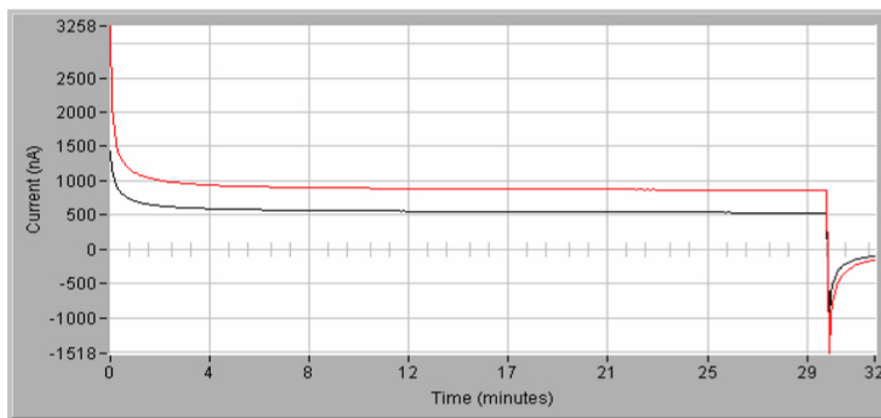
- Prikupljanja, odnosno unosa podataka o izolacionom sistemu mašine kao što su debljina i tip izolacionog materijala, nazivne veličine, godina proizvodnje itd. i formiranja „zdravstvenog kartona“ mašine koji će biti korišćen za skladištenje budućih merenja. Ovako detaljno opisivanje mašine omogućava preciznu dijagnostiku, pouzdano skladištenje podataka merenja i, možda najvažnije, trend analizu stanja EIS.
- Zatim se integrisanim sensorima prikupljaju podaci o ambijentalnim uslovima. Povišena vlaga ili temperatura mogu uticati na karakteristične veličine koje su od značaja, te se ove vrednosti mere ugrađenim senzorom na samom uređaju.
- Izvode se dva merenja kapacitivnosti izolacionog sistema na niskom naponu i pri dve frekvencije – DC i 1kHz AC. Razlika između ove dve kapacitivnosti ukazuje na površinsku kontaminaciju statorskog namotaja, kao i ovlaženost izolacionog sistema.
- Prvi naponski nivo – izolacija se izlaže jednosmernom naponu određene magnitude u trajanju od 30 minuta. Nakon toga se namotaj uzemljuje i prazni 2 minuta.
- Tokom perioda relaksacije, pražnjenja, dielektrika meri se struja pražnjenja. Podatak o intezitetu i trajanju ove struje može ukazivati na stepen ovlaženosti izolacionog sistema.
- Nakon toga, u drugom ciklusu, namotaj se opet izlaže visokom jednosmernom naponu, višem od onog u prvom ciklusu, a obično dvostruke magnitude, takođe u trajanju od 30 minuta, nakon čega sledi identičan ciklus pražnjenja od 2 minuta.



Slika 5. Principijelna šema delovanja EDA test sistema, V – stabilan izvor jednosmernog napona; $P1, P2$ – prekidači; nA – nanoampermetar; R_i – izolacioni otpor; C_g – geometrijska vrednost kapaciteta; R_a, C_a – ekvivalentni parametri dielektrične apsorpcije

Principijelna šema je data na slici 5. Uključenjem prekidača P1 visoki jednosmerni napon izvora V se dovodi na terminale EIS koji se ispituje. Time je započet apsorpcioni ciklus. Nakon 30 minuta, P1 se otvara, istovremeno zatvarajući prekidač P2, čime se otpočinje dvominutno pražnjenje izolacionog sistema, tj. period relaksacije dielektrika, reapsorpcije.

Tokom perioda „punjenja“ i „pražnjenja“ izolacionog sistema u oba ciklusa se konstantno meri struja kroz izolacioni sistem i vrši iscrtavanje grafika $i(t)$ u realnom vremenu (Slika 6). S obzirom da je napon konstantan, jednostavno se prikazuje i grafik promene otpornosti izolacionog sistema.



Slika 6. Struje kroz izolacioni sistem tokom testa, crna - struja tokom prvog ciklusa sa nižim naponom, crvena - struja tokom drugog testa pri višem naponu

Ova dva ciklusa se sprovode u cilju provere linearnosti karakteristika izolacije sa podizanjem napona i kako bi se uočili eventualni problemi pri višim naponskim nivoima. Karakteristične veličine koje EDA sistem prikuplja merenjem su date u tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristične veličine koje meri i izračunava EDA sistem

Insulation Resistance at °C	Izolacioni otpori svedeni na temperature 20°C i 40°C, izraženi u GΩ
Polarisation index	Polarizacioni indeksi
Time Constant (sec)	Vremenska konstanta
Std. Leakage Current xx°C	Specifične struje curenja svedene na 20°C i 40°C, u mA/VF
Reabs. Leakage Current Ratio	Odnos struje reapsorpcije pri dva napona
Standard Reabs. Index at thickness	Specifična struja reapsorpcije u odnosu na debljinu izolacije svedena na 20°C i 40 °C

Capacitance Ratio	Odnos kapaciteta izolacije pri jednosmernom ispitnom naponu i pri naponu učestanosti 1 kHz
Voltage Ratio	Odnos napona pri prvom i drugom ciklusu ispitivanja U_{test2}/U_{test1}
Leakage Current Ratio	Odnos struja curenja nakon tridesetominutnog perioda izlaganja dielektrika ispitnim naponima U_{test2} i U_{test1}

Iz navedenih testova sistem prikuplja dovoljno informacija da opiše trenutno stanje EIS statorskog namotaja. Merenja se mogu vršiti u sprezi namotaja sve tri faze prema uzmljenim delovima, ali i svakog namotaja ponaosob prema uzemljenim delovima i druga dva namotaja. Druga sprega je moguća ukoliko je zvezdište namotaja pristupačno i razvezivo. Pri tome merenje traje tri puta duže. S obzirom da se metodologijom posmatra ceo izolacioni sistem, globalno, i da su namotaji sve tri faze u istim radnim uslovima i okruženju, obično je dovoljno posmatrati statorski namotaj kao celinu, tj. sve tri faze zajedno.

4. Analiza rezultata pomoću DIAGHELP softverskog paketa

U cilju pouzdane procene dobijenih rezultata i dijagnostike potencijalnih problema u EIS namotaja poželjno je imati referentna merenja nastala nakon proizvodnje obrtne mašine ili nakon nekog obimnijeg servisa/remonta. Ove vrednosti se smatraju „*fingerprintom*“ zdravog namotaja. Zatim bi se dobijene vrednosti uporedile sa novodobijenim nakon sledećeg rutinskog testa, te bi se njihovom komparacijom dobile prve indicije o promeni stanja EIS namotaja. Softverski dodaci EDA sistema nude i predikciju potencijalnih problema u EIS namotaja statora. Ovako sposoban softver nastao je empirijskim zaključivanjima na velikom broju namotaja mašina različitih dimenzija, snaga, naponskih nivoa i namena. EDA DiagHelp predstavlja integralni deo sistema EDA i omogućava trenutnu analizu podataka prikupljenih testom i pruža indicaciju o potencijalnim slabim mestima u električnom izolacionom sistemu mašine. Poredeći izmerene vrednosti sa memorisanim kriterijumima softver nudi paletu predefinisanih mogućih defekata i problema te naznaku da li je ili nije neki od njih prisutan. Pri tome program razlikuje dve vrste kvarova: 1) Povratne (reversible), koji podrazumevaju probleme koji se mogu popraviti određenim servisnim intervencijama. Tu se pre svega misli na postojanje površinske vlage i kontaminacije polarnim produktima starenja kao i prodor vlage unutar EIS, kao problem koji se čišćenjem/sušenjem može popraviti i, 2) Nepovratne (non-reversible), probleme koji su posledica nepovratnih procesa starenja usled TEAM faktora i koji jednom kada se uoče mogu samo napredovati. Nemoguće ih je otkloniti redovnim remontnim aktivnostima, već se na njih može uticati samo kapitalnim servisima, premotavanjem namotaja statora i sl. Na slici 7 je prikazan izgled dela izveštaja koji generiše EDA DiagHelp softverski paket za statorski namotaj visokonaponskog motora koji

je relativno nov i u dobrom stanju. „Simbolične“ signalne lampe sa desne strane prozora ukazuju na status navedenog poremećaja/defekta u EIS statorskog namotaja sa logikom semafora. Kao što je već napomenuto, logika EDA testa je razvijana dugi niz godina studioznim analizama rezultata prikupljenih na velikom broju obrtnih mašina. Slika 8 prikazuje izveštaj o ispitivanju visokonaponskog motora sa indikacijom pukotina u izolacionom sistemu.

Reversible Problems	
Insulation State:	Clean and Dry
Insulation Resistance:	Normal
Surface Currents:	No Trace
Surface Moisture:	No Trace
Surface Contamination:	No Trace
Internal Moisture:	No Trace
Internal Contaminator:	No Trace
No Reversible Problems	
Transverse Current:	No Trace
Abnormal Aging:	No Trace
Aglomerant State:	Normal
Dielectric Structure:	Excellent

Slika 7. Tabela predefinisanih potencijalnih problema EIS zadovoljavajućeg statorskog namotaja sa semaforima stanja i ocenama u vidu komentara

Reversible Problems	
Insulation State:	Clean and Dry
Insulation Resistance:	Normal
Surface Currents:	No Trace
Surface Moisture:	No Trace
Surface Contamination:	No Trace
Internal Moisture:	No Trace
Internal Contaminator:	No Trace
No Reversible Problems	
Transverse Current:	Traces of Cracked Insolation
Abnormal Aging:	No Trace
Aglomerant State:	Normal
Dielectric Structure:	Normal

Slika 8. Tabela stanja EIS VN motora u rezervi sa indikacijom pukotina u izolaciji

Rezultati dobijeni na ovaj način su prilično indikativni i koncizni. Neposredno ukazuju na moguće probleme u električnom izolacionom sistemu namotaja statora i omogućavaju brz i jeftin uvid u stanje istog.

Pored opisanog DIAGHELP softvera, u EDA sistem je implementiran i softverski paket EDA Trend, kojim se mogu porediti i pratiti izmerene vrednosti sa vrednostima izmerenim prilikom nekog od prethodnih ispitivanja. Na ovaj način se jednostavno uočavaju bilo kakve promene i pogoršanja u električnom izolacionom sistemu statorskog namotaja.

5. Zaključak

EDA test je vrsta unapređenog „*screening-a*“ električnog izolacionog sistema statorskih namotaja obrtnih mašina. Izlaganjem izolacionog sistema nizu testova izračunava brojne karakteristične veličine, te kompleksnim softverskim rešenjima nastoji obraditi i klasifikovati prikupljene podatke. Kao rezultat nudi grupu parametara izolacionog sistema čijom se aproksimacijom dolazi do procene stanja EIS statora. Metoda je prilično mlada i nedostatak iskustva u okvirima domaćeg elektroenergetskog sistema je evidentan. Prilično je jednostavna i jeftina i kao takva naročito pogodna za „*screening*“ često, sa stanovišta profilaktičkih ispitivanja, marginalizovanih izolacionih sistema visokonaponskih motora.

Zahvalnica

Rad je nastao u okviru projekta TR 33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora i primenom novih metoda ispitivanja i daljinskog nadzora“, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

- [1] P. Tavner, L. Ran, J. Penman, H. Sedding, *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*, London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [2] M. G. Say, *Windings in Alternating Current Machines*, 4th ed. Edinburgh, UK: Pitman Publishing, First published 1976, ch. 3, pp. 63-113.
- [3] SRPS EN 60034 (Серија стандарда)
- [4] „IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery“, *IEEE Std 43-2013 (Revision of IEEE Std 43-2000)*, pp. 1–37, March 2014.
- [5] „IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10,000 kVA and Larger),“ in *ANSI/IEEE Std 56-1977*, vol., no., pp.1-24, March 15 1977, [doi: 10.1109/IEEESTD.1977.120246](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1977.120246)

- [6] „IEEE Guide for Operation and Maintenance of Hydro-Generators," in *IEEE Std 492-1999*, vol., no., pp.1-70, Feb. 19 1999 doi: 10.1109/IEEESTD.1999.89194
- [7] A.Tabernero, B.Batle, LM.Lopez, A.Villarubia, S.Rodriguez, O.Martinez, „EDA test to perform predictive maintenance in relevant rotating machines“, *A1-107, CIGRE 2008*
- [8] EDA III (*Electronic Dielectric Anaslyser*), User Manuel
- [9] A.Tabernero, B.Batle, „*Predictive Maintenance in hydrogenerators*“, Hydro 2007.
- [10] *Generator Maintenance, Inspection and Test Programmes*. TB 386, Paris (21 rue d'Artois, 75008): CIGRÉ, 2009.
- [11] S. Schlögl, D. Lenko, „High-voltage insulation with enhances delamination resistance“, Society of Plastic Engineers (SPE), doi: 10.2417/spepro.005620, 2014.
- [12] „IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage," in *IEEE Std 95-2002 (Revision of IEEE Std 95-1977)*, vol., no., pp.1-56, April 12 2002 doi: 10.1109/IEEESTD.2002.93574
- [13] TB 522: 2013, Generator Stator Winding Stress Grading Coating Problem

Abstract. The insulation system of rotating machines of high importance has always been the object of thorough screening with certified test methods that are getting constantly improved. Low-power machines and “less important” machines like high voltage motors, are rarely subjected to detailed electrical tests because of low resources allocated for their maintenance. The introduction of the EDA methodology in practice creates the conditions for reliable and complete diagnostics of stator windings of big machines, as well as the fast, easy and inexpensive screening for low-power machines (i.e. HV motors). The aim of the paper is to present the EDA methodology and its possibilities, including the solutions within the hardware and software.

Keywords: examining of rotating machines, EDA methodology, diagnostics, screening.

Application of EDA methodology for assessment of the rotating machines insulation system condition

Rad primljen u uredništvo: 31.10.2016. godine.
Rad prihvaćen: 06.12.2016. godine.

