

Fazi logički ekspertski sistem za procenu stanja izolacionog sistema statora VN motora

Denis Ilić^{1,2}, Mileta Žarković², Momčilo Milić², Đorđe Jovanović¹, Radmila Partonjić^{1,2}, Nikola Stanojević¹

¹Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73,
11000 Beograd, Srbija

²Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

denis.ilic@ieent.org

Kratak sadržaj: Tokom rada električni izolacioni sistem (EIS) visokonaponskih motora je izložen uticaju raznih nepovoljnih faktora koji mogu uticati na njegovo ubrzano starenje. Blagovremeno poznavanje stvarnog stanja EIS od velike je pomoći pri raspoređivanju sredstava namenjenih servisnih aktivnosti i unapređivanju pouzdanosti pogona. Stanje VN motora se u određenoj meri može proceniti izvršenjem dostupnih električnih ispitivanja. Veliki nedostatak predstavljaju nedovoljno precizni i nedefinisani kriterijumi u važećim standardima što unosi potencijalnu grešku neobjektivnosti procenjivača rezultata. U radu će biti predložena upotreba fazi logičkog ekspertskog sistema za procenu stanja EIS statora VN motora na osnovu rezultata električnih merenja, sa osvrtom na sve pogodnosti koje automatizacija procesa procene i analize stanja nosi sa sobom. Kreirani ekspertski sistem će se u potpunosti oslanjati na kriterijume definisane u IS32 –Internom standardu JP EPS.

Cljučne reči: Fazi logika, VN motor, dijagnostika stanja

1 Uvod

Statorski namotaji VN obrtnih mašina izloženi su tokom pogona uticaju zbirnog tzv. TEAM faktora (temperatura, električno polje, ambijent, mehanička naprezanja) koji mogu značajno uticati na skraćanje životnog veka izolacije

[1,2]. Visokonaponski elektromotori su u pogledu održavanja i nadgledanja stanja izolacionog sistema neretko veoma zapostavljeni.

Održavanje se i pored savremenog trenda prelaska na održavanje prema stanju, i dalje uglavnom zasniva na minimalnim servisnim i sanacionim radovima u fiksnim vremenskim intervalima tj. periodično održavanje ili korektivno održavanje, tj. nakon kvara ili ispada po delovanju neke od zaštita. Moderni načini poslovanja pokazuju da ovakav pristup nije naročito isplativ i podesan u savremenim uslovima eksploatacije elektroenergetske opreme. Troškovi periodičnog održavanja u fiksnim vremenskim intervalima neretko mogu višestruko premašiti troškove same implementacije savremenijeg pristupa održavanja prema stanju. Dodatno, značajne uštede se ostvaruju u pogledu biranja podesnog blagovremeno planiranog trenutka za preventivne servisne aktivnosti čime se mogućnost iznenadnih ispada svodi na minimum, te se ispravno planiraju izdvojena sredstva na elementima kojima je najpotrebnije.

2 Električne metode ispitivanja VN motora

Neke od uobičajnih dijagnostičkih električnih metoda ispitivanja stanja električnog izolacionog sistema statorskog namotaja obrtnih mašina podrazumevaju [2-7]:

1. Merenje električnog otpora izolacije statora
2. Merenje faktora dielektričnih gubitaka
3. Merenje parcijalnih pražnjenja

Pored navedenih metoda u upotrebi su i druge, kao npr. ispitivanje dovedenim povišenim naizmerničnim, jednosmernim ili impulsnim naponom, ali se rezultati ovih metoda tumače kao „GO-NO GO“ ispitivanja, tj. sama po sebi pružaju malo dijagnostičkih podataka, osim da je EIS prošao odnosno nije prošao test.

Postojeći internacionalni i domaći standardi u velikoj meri definišu način izvođenja pomenutih merenja. Za pojedine metode standardi nejasno ili uopšte ne definišu kriterijumske vrednosti. Ovo ostavlja mnogo nepoznatih pred odgovorne inžinjere koji imaju zadatak da blagovremeno planiraju servise u cilju optimalnog upravljanja životnim vekom VN motora.

Navedene dijagnostičke ispitne metode će biti upotrebljene kao ulazne veličine kreiranog fazi logičkog ekspertskog sistema za procenu stanja EIS statora.

2.1 Merenje električnog otpora izolacije

Merenje električnog otpora izolacije statorskog namotaja predstavlja jednu od najstarijih, sada već, bazičnih ispitnih metoda. Merenje se izvodi stabilisanim izvorom visokog jednosmernog napona, uz merenje struja curenja kroz EIS u vremenu [7]. Merenje se vrši minimum u trajanju od 1min uz beleženje vrednosti otpora izolacije u 15" i 60", te se proračunava koeficijent apsorpcije kao R_{60}/R_{15} . Kriterijumske vrednosti usvojene prema Internom standardu JP EPS su date u tabeli 1 [7]. Niske vrednosti otpora izolacije mogu ukazivati na ovlažene i zaprljane EIS, dok nasuprot tome, visoke vrednosti daju potvrdu da je EIS kompaktnan, čist i suv i da ne zahteva hitne servisne aktivnosti.

Tabela 1 Kriterijumske vrednosti rezultata merenja otpora izolacije prema IS32

R ₆₀ (MΩ) na 20°C, za 6kV motore		
Grupa kvaliteta	K	R ₆₀ /R ₁₅
I	≥ 300	≥ 2
II	≥ 60	≥ 1,3
III	< 60	< 1,3

2.2 Merenje faktora dielektričnih gubitaka

Faktor dielektričnih gubitaka tgδ se tradicionalno smatra izuzetnim indikatorom kompaktnosti i očuvanosti EIS. Merenje se izvodi namenskim mernim mostovima pri podizanju ispitnog napona od 0 do nominalnog napona u koracima od po 0.2Un. Vrednost tgδ pri malim vrednostima ispitnog napona govori o globalnom kvalitetu upotrebljenih materijala. Porast tgδ sa podizanjem ispitnog napona ukazuje na pojavu jonizujućih šupljina unutar EIS, zaostalih tokom procesa proizvodnje ili novonastalih usled čestih termičkih ciklusa prouzrokovanih intermitentnim radom i/ili preopterećenjem motora.

Kriterijumi u međunarodnim standardima nisu definisani, te se stoga dosta neuravnoteženosti prilikom procene stanja može dogoditi u praksi. Naime, fabričke procedure često sadrže ove kriterijumske vrednosti stečene empirijski ali sa velikom marginom, što je nepovoljno po kvalitet EIS.

Kriterijumi prezentovani u [7] su dati kao u tabeli 2.

Tabela 2 Kriterijumske vrednosti tgδ prema IS32

Grupa	tgδ _{0,2}	Δtgδ/0,2U _n	
		(0,2-0,6)U _n	(0,6-1,0)U _n
	(10 ⁻³)	(10 ⁻³)	(10 ⁻³)
I	≤ 30	≤ 6	≤ 8
II	≤ 40	≤ 12	≤ 16
III	>40	> 12	> 16

2.3 Merenje parcijalnih pražnjenja

Parcijalna pražnjenja predstavljaju delimične preskoke tj. lokalna pražnjenja u šupljinama unutar EIS ili preskoke po površini dielektrika. Razvijene su brojne metode detekcije ovih strujnih impulsa koji se mogu naći u širokom frekventnom spektru. Uobičajno, na EIS obrtnih mašina merenje se vrši direktnom električnom metodom detekcijom ovih strujnih impulsa preko spreznog kondenzatora. Uvođenjem merenog signala u moderne digitalne sisteme akvizicije mogućnosti obrade signala i ekstrakcije korisnih informacija su postale izuzetne. Međunarodni standardi ne pružaju informacije o kriterijumskim vrednostima, već samo obrađuju problematiku mogućih ispravnih načina izvođenja merenja i načina detekcije i izolovanja potencijalnih smetnji. Prema IS 32 kritične vrednosti su definisane na način prikazan u tabeli 3.

Tabela 3 Kriterijumske vrednosti intenziteta parcijalnih pražnjenja prema [7]

	PD _{0,6U_n}	PD _{1,0U_n} (nC)
Группа	(nC)	(nC)
I	≤ 5	≤ 10
II	5 - 10	10 - 20
III	> 10	> 20

3 Fazi logički ekspertski sistem za evaluaciju rezultata ispitivanja VN motora

Predloženi fazi logički sistem (FLS) je kreiran u programskom paketu Matlab. Mogućnosti FL paketa alata u okviru programskog paketa Matlab dozvoljavaju izradu i podešavanje FL kontrolera u realnom vremenu i potpuno prilagođenje potrebama i specifičnostima pojedinih pogona, postrojenja, opreme.

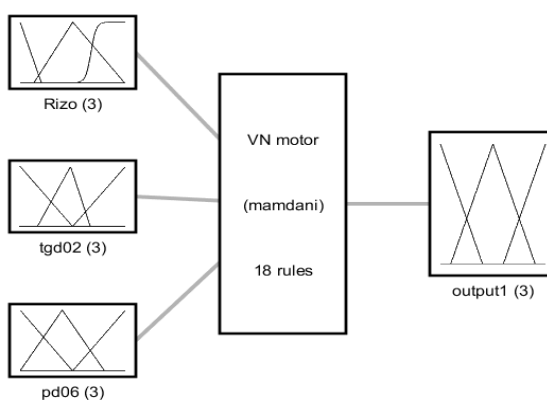
Kao ulazni podaci za procenu stanja izolacije statora VN motora upotrebene su sledeće tri ulazne veličine:

1. Električni otpor izolacije namotaja statora - jednominutna vrednost R_{60}
2. Faktor dielektričnih gubitaka pri $0.2U_n$
3. Intenzitet parcijalnih pražnjenja pri $0.6U_n$

Blok šema FLS je prikazana na slici 1. Proces primene fazi logike podrazumeva sledeće korake:

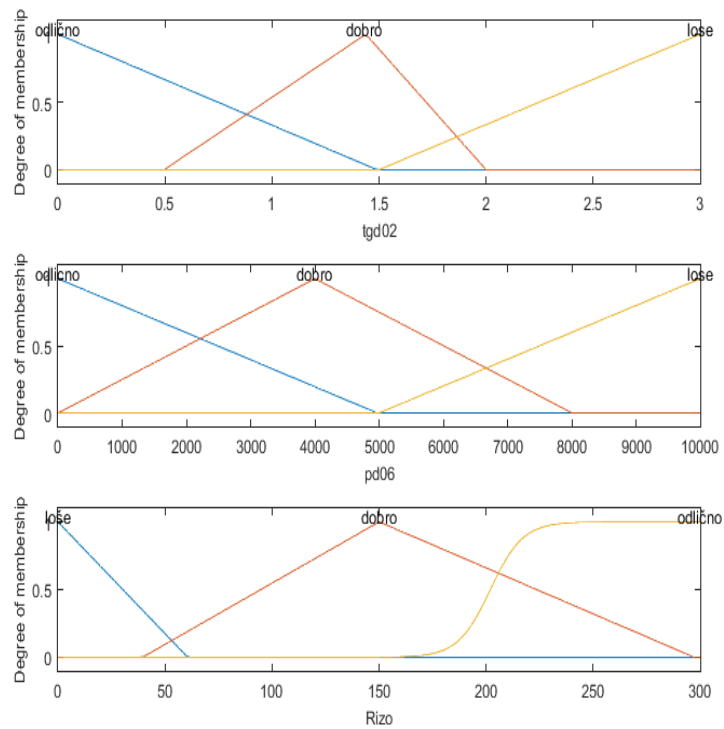
1. Fazifikacija ulaznih veličina
2. Definisanje baze pravila
3. Defazifikacija

Kriterijumske vrednosti su usvojene iz navedenog internog standarda JP EPS IS 32 i integrisane su u FLS kroz funkcije pripadnosti kao na slici 2. Funkcije pripadnosti za sve tri ulazne veličine su definisane kao odlično, dobro i loše. U zavisnosti od rezultata izmerenih pri ispitivanju, ulazne veličine kroz funkcije pripadnosti uzimaju sa određenim stepenom pripadnosti neku od vrednosti, odlično, dobro ili loše. FL kontroler obrađuje ulazne podatke kroz bazu relacija. Relacije definisane između pojedinih ulaznih parametara i izlaza su definisane kroz 18 *IF-THEN* pravila implementirana u okviru kreiranog Mamdani fazi logičkog kontrolera. Ova pravila su definisana na osnovu ekspertskih zaključaka i preporuka definisanih navedenim standardom kao i preporuka i zaključaka eksperata iz zvaničnih izveštaja o ispitivanju.



System VN motor: 3 inputs, 1 outputs, 18 rules

Slika 1 Fazi logički ekspertski sistem za procenu stanja EIS statora VN motora



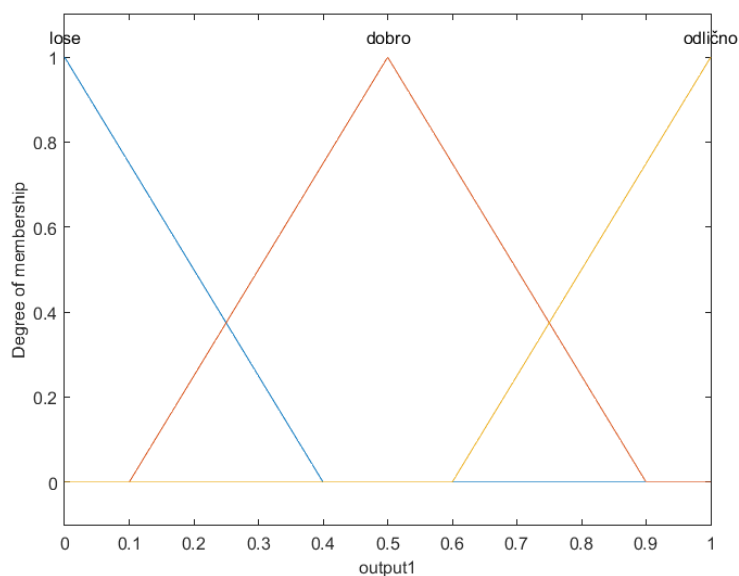
Slika 2 Funkcije pripadnosti za pojedine ulazne veličine

Tabela 4 Definirana pravila fazi logičkog ekspertskog sistema

Red br. pravila	Definisano pravilo
1	If (Rizo is loše) and (tgd02 is lose) and (pd06 is lose) then (output1 is lose)
2	If (Rizo is loše) then (output1 is lose)
3	If (Rizo is loše) and (tgd02 is dobro) and (pd06 is dobro) then (output1 is lose)
4	If (Rizo is dobro) and (tgd02 is dobro) and (pd06 is dobro) then (output1 is dobro)
5	If (Rizo is odlično) and (tgd02 is odlično) and (pd06 is odlicno) then (output1 is odlično)
6	If (Rizo is odlično) and (tgd02 is dobro) and (pd06 is odlicno) then (output1 is odlično)
7	If (Rizo is odlično) and (tgd02 is dobro) and (pd06 is dobro) then (output1 is dobro)
8	If (Rizo is loše) and (tgd02 is lose) and (pd06 is odlicno) then (output1 is dobro)
9	If (Rizo is loše) and (tgd02 is dobro) and (pd06 is lose) then (output1 is lose)
10	If (Rizo is odlično) then (output1 is odlično)
11	If (Rizo is dobro) then (output1 is odlično)

Red br. pravila	Definisano pravilo
12	If (tgd02 is lose) then (output1 is lose)
13	If (pd06 is lose) then (output1 is lose)
14	If (tgd02 is odlično) and (pd06 is odlicno) then (output1 is odlično)
15	If (tgd02 is dobro) and (pd06 is dobro) then (output1 is dobro)
16	If (pd06 is lose) then (output1 is lose)
17	If (pd06 is odlicno) then (output1 is odlično) (1)
18	If (pd06 is dobro) then (output1 is dobro) (1)

Izlazne veličine se definišu takođe kao odlično, dobro i loše, na svojevrsni način kao indeks zdravlja statorskog namotaja. Funkcije pripadnosti izlaza su prikazane na slici 3.



Slika 3 Prikaz funkcija pripadnosti izlazne veličine

4 Primeri proračuna stanja statora VN motora

Upotrebom kreiranog FLS-a biće određene vrednosti koje definišu stanje statorskih namotaja za 5 različitih motora.

U tabeli 5 prikazane su vrednosti odabranih ulaznih veličina kao i proračunati izlazi, koji se mogu smatrati svojevrsnim *indeksom zdravlja* (IZ) VN motora. Što je ova vrednost veća, opšte stanje motora, shodno rezultatima, je bolje, i obratno.

Tabela 5 Primer podataka korišćenih za testiranje kreiranog FLS-a

Red. br. motora	Rizo	tgδ@0,2Un	PD@0,6Un	Proračunat IZ
1	20	1.139	7000	0,329
2	45	3	9000	0,198
3	2400	1,5	1000	0,691
4	4500	0,63	550	0,748
5	100	0,866	9700	0,131

U primeru iz tabele 5 se može primetiti da se jasno izdvajaju stanja motora koja mogu indikovati potencijalni problem. Tako, npr. za motor br. 2 čiji rezultati ukazuju na nisku vrednost otpora izolacije, ali i istovremeno veoma visoku vrednost intenziteta parcijalnih pražnjenja proračunati indeks zdravlja iznosi 0,198, što odgovara izlazu „Loše“. Ova vrednost dodatno opada ukoliko se npr. intenzitet parcijalnih pražnjenja dodatno uveća kao u primeru motora br. 5. Nasuprot tome, prilično dobre, zadovoljavajuće vrednosti ispitivanja su dobijena za motora br. 3, dok za motor br. 4 je indeks 0,748 što ukazuje na ocenu „Odlično“. Istovremeno, sortiranjem tabele po proračunatim indeksima zdravlja statora, moguće je definisati „kandidate“ za servis. U prikazanom slučaju, preporuka je da motori pod rednim brojem 5, 2 i 1 budu upućeni na servis, dok motri 3 i 4 mogu nastaviti pogon.

5 Zaključak

Iz navedenog primera može se zaključiti da je primena ovakvog načina objektivnog procenjivanja stanja izolacionog sistema statora izuzetno pogodna, tim pre što ne izdvaja samo tri kategorije (odlično, dobro i loše) već omogućava sortiranje proračunatih indeksa prema stanju, npr. od najlošijeg prema najboljem. Ovo omogućava objektivnu i ponovljivu obradu rezultata ispitivanja te odabir pogodnih motora koji zahtevaju servisne radnje u cilju produžetka životnog veka. U radu je prikazan način kreiranja FLS kao i podešavanja kriterijuma unutar FLS sa svega tri ulazna parametra. Moguće je sistem proširiti sa dodatnim ulazima u zavisnosti od prakse ispitivanja i dostupnih rezultata. Ovako kreirani fazi logički sistemi se mogu u potpunosti prilagoditi određenim internim standardima i protokolima fabrika, elektrana i ostalih elektroenergetskih postrojenja.

Literatura

- [1] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, Volume 21 of IEEE Press Series on Power and Energy Systems, John Wiley & Sons, 2004, ISBN 0471682896
- [2] Denis Ilić, Mileta Žarković, Zlatan Stojković "Artificial intelligence system for stator condition diagnostic", *Electrical Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01402-6>
- [3] *Evaluation and qualification of electrical insulation systems*, IEC 60505:2011.
- [4] Rao Burjupati "Assessment of Stator winding Insulation, PART 1 - Review of deterioration mechanisms and condition monitoring techniques" *The Journal of CPRI*,. ISSN 0973 -0388, 2010.
- [5] *Rotating Electrical Machines – Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation*, IEC 60034-27-1:2017, ISBN 978-2-8322-5104-1
- [6] *Rotating Electrical Machines – Part 27-3: Dielectric dissipation factor measurement on stator winding insulation of rotating electrical machines* IEC 60034-27-3:2015.
- [7] *IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Including Acceptance and Performance Testing and Parameter Determination for Dynamic Analysis*, IEEE Standard 115-2019.
- [8] Internal Standard: Electrical Power Industry of Serbia – Rotating Electrical Machines:Electric Insulation Systems (EIS) – Tests for EIS in Service – Periodic Tests, First Edition IS32/1, Oktober 2015.

Abstract. During operation, the electrical insulation system (EIS) of high-voltage motors is exposed to various factors that can accelerate its aging. Timely knowledge of the actual state of the EIS is of great help in allocating funds for service activities. The condition of the EIS of the HV motor can be assessed to some extent by performing available electrical tests. A major shortcoming is the lack of accuracy and the lack of well-defined criteria in the current standards. In that way, a potential error can bias the evaluation of recorded results. The paper proposes the use of a fuzzy logic expert system for assessing the condition of EIS stators of HV motors based on the results of electrical measurements. Also, the proposed fuzzy approach is fully discussed. The created expert system fully relies on the criteria defined in the IS32-Internal Standard of PE EPS.

Keywords: fuzzy logic, HV motor, condition assessment

Fuzzy Logic Expert System for Assessing the Condition of the HV Motor Stator Insulation System

Denis Ilić, Mileta Žarković, Radmila Partonjić, Đorđe Jovanović, Nikola Stanojević

Rad primljen u uredništvo: 01.11.2021. godine.

Rad prihvaćen: 03.12.2021. godine.