

PROCENA INDEKSA ZDRAVLJA TRANSFORMATORA U SLUČAJU NEPOUZDANIH INFORMACIJA

POWER TRANSFORMER HEALTH INDEX ESTIMATION IN THE PRESENCE OF UNRELIABLE INFORMATION

Srdan MILOSAVLJEVIĆ, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"
Aleksandar JANJIĆ, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

KRATAK SADRŽAJ

Distribucija električne energije zahteva dobro isplaniran budžet za preventivno i korektivno održavanje kao i zamenu jedinica koje su u nezadovoljavajućem stanju. Zbog visokih troškova energetskih transformatora (ET), razvoj metodologije za povećanje životnog veka ET kroz uspostavljanje prioriteta za kontrolu i održavanje je od velikog značaja. Zbog nedostatka redovnih merenja i inspekcija, metodologija za njihovo rangiranje treba da obuhvati vrednost dostupnih informacija za opisivanje trenutnog stanja ET-a. U radu je predloženo rešenje u vidu indeksa zdravlja, kao sastavnog dela upravljanja resursima. Pouzdanost rezultata merenja izračunava se korišćenjem algoritma za evidencijalno zaključivanje zasnovanog na Dempster – Šeferovoj teoriji. Predložena metodologija testirana je na realnim podacima ET-a u pogonu.

Ključne reči: Energetski transformator, Dempster-Šefer, Evidencijalno zaključivanje, indeks zdravlja, ocena stanja

ABSTRACT

Market-oriented power distribution system requires a well-planned budget and scheduled preventive and corrective maintenance during a replacement of the units that are in an unsatisfactory condition. Due to the high cost of energy power transformers (ET), developing a methodology for increasing the lifetime of ET through the establishment of priorities for control and maintenance is of great importance. Because of the lack of regular measurement and inspections, a methodology for their ranking should include the value of available information to describe ET current state. The paper proposes a solution in the form of health index, as an integral part of resource management. The confidence in the measurement results is calculated using an Evidential reasoning algorithm based on the Dempster – Shafer theory. The proposed methodology is tested on real data of an installed ET.

Key words: Power transformer. Dempster-Shafer, Evidential reasoning, health index, condition assessment

Elektrotehnički Insitut Nikola Tesla Koste Glavinića 8^a 11 000 Beograd

UVOD

Energetski transformatori su napravljeni da bezbedno rade tridesetak godina. U praksi, životni vek transformatora može biti veći od 60 godina ukoliko se on pravilno održava. Obično nije ekonomično da neki stari transformator bude podvrgnut rigoroznim inspekcijama i temeljnim testiranjima. Zbog toga je potrebna jasna strategija za povećanje životnog veka transformatora kroz uspostavljanje prioriteta za kontrolu i njihovo održavanje [1]. Kontrola i dijagnostika izolacionih sistema postali važan deo kontrole transformatora. Koriste se različite metode kontrole i dijagnostike, na osnovu širokog spektra fizičkih, električnih, mehaničkih, termičkih i optičkih efekata. One omogućavaju procenu stanja, pružaju informaciju o starenju i preporučuju mere za poboljšanje kvaliteta izolacije i procene životnog veka transformatora.

U dosadašnjoj praksi Elektroprivrede Srbije, dijagnostika stanja svakog pojedinačnog ET je prikazivana opisno, posebno u domenu hemijskih i električnih ispitivanja. U poslednje vreme sve više i više se raspravlja o

korišćenju zdravstvenog pokazatelja za procenu stanja transformatora i razvoj efikasnijih metoda za održavanje [2, 3, 4]. Za izračunavanje zdravstvenog pokazatelja predlažu se dijagnostički faktori (kako transformatora, tako i regulacione preklopke) koji kvantifikuju globalno stanje energetskih transformatora. Ovaj faktor omogućava procenu preostalog životnog veka transformatora, uzimajući u obzir neke od najvažnijih karakteristika njihovih izolacionih sistema. U studiji [1] definisana je metodologija kojom bi se izvršila integralna kvantifikacija stanja ET na osnovu rezultata hemijskih i električnih ispitivanja, podataka iz održavanja i podataka o istorijatu rada, uvođenjem indeksa stanja ili tzv. „indeksa zdravlja“ i prema kojima bi se izvršilo rangiranje ET po pogonskom stanju. Indeksiranje transformatora prema pogonskom stanju, uz dodatnu analizu rizika omogućava bolje sagledavanje raspoloživosti i pouzdanosti velikih populacija transformatora. U studiji je takođe [1] predviđeno izračunavanje zdravstvenog pokazatelja na osnovu rezultata testa izolacionog sistema transformatora (analiza rastvorenih gasova, kvaliteta ulja, sadržaja furana, odnosa broja namotaja, induktivnosti usled rasipanja, otpora namotaja, stanja izvoda, opšteg stanja regulacione preklopke, faktora dielektričnih gubitaka).

Glavni problem pri izračunavanju zdravstvenog faktora transformatora, predstavlja, međutim, nepouzdanost ulaznih podataka. Zakonskim propisima i internima pravilnicima predviđeni su rokovi za određene aktivnosti [5], ali neka merenja primenjuju se ili retko, ili tek ukoliko postoji naznaka o pogoršnom stanju transformatora. Zbog toga je i rangiranje transformatora po stanju suočeno sa nepreciznostima i netačnostima, te je potrebno razviti neku metodu za procenu tačnosti rezultata. U pomenutoj studiji [1] ova tačnost je računata preko indeksa ažurnosti, ali i ovaj indeks pokazuje izvesne nedostatke kada se radi o transformatorima za koje ne posedujemo podatke duže vreme.

U ovom radu, korišćena je metoda zaključivanja na osnovu dokaza (engl. “Evidential reasoning”) zasnovana na Dempster – Šeferovoj teoriji [6]. ER pristup je pogodan za agregaciju problema na više nivoa, kao što je u pitanju procena stanja energetskog transformatora. Praktično, procena stanja postaje više-kriterijumski problem u čijem modelu postoje različiti tipovi kvantitativnih i kvalitativnih neizvesnosti i nesigurnosti. Na osnovu ove teorije, u radu je predstavljena razvijena metodologija koja koristi redukovani model transformatora i individualni indeks zdravlja svake komponente. Konačni rezultat je indeks zdravlja transformatora koji je predstavljen kao raspodela verovatnoća svakog pojedinačnog stanja.

INDEKS ZDRAVLJA

Indeks zdravlja (IZ) predstavlja alat koji kombinuje rezultate električnih ispitivanja u pogonu, laboratorijskog (hemijskog) ispitivanja transformatorskog ulja, podatke iz održavanja i podatke o istorijatu rada kako bi se, pomoću numeričkog prikaza ocene stanja i rangiranja transformatora upravljalo osnovnim resursima i izgradili prioriteta pri izradi planova održavanja i kapitalnih investicija [2]. Na osnovu uvedene metodologije za proračun IZ biće omogućena ocena stanja velike populacije distributivnih transformatora i njihovog grupisanja prema stanju. Uvođenje ovakvog koncepta dovešće do povećanja raspoloživosti i pouzdanosti, uz smanjenje troškova održavanja. S obzirom na to da se procena stanja jednog ET zasniva na [1,7] :

- rezultatima električnih i hemijskih ispitivanja
- podacima o održavanju
- istorijatu rada – pogonskim događajima
- stanju opreme: prolazni izolatori, rashladni sistem, transformatorski sud, dilatacioni sud i pomoćna oprema
- procenjenom stanju papirne izolacije
- mišljenju stručnjaka,

IZ predstavlja sumu ovih procena. Vrlo je važno da se indeks zdravlja posmatra kao promenljiv parametar, jer se, vršeći višeparametarsku analizu stanja, menja tokom života ET. [8]

Procena stanja ET treba da obuhvati ocenu stanja ključnih delova: magnetnog kola i namotaja, čvrste izolacije i izolacionog ulja, provodnih izolatora i regulatora napona, rashladnog sistema, transformatorskog suda, dilatacionog suda i pomoćne opreme na osnovu rezultata dobijenih primenom odgovarajućih ispitnih metoda iz oblasti hemijskih i električnih ispitivanja i vizuelne kontrole kao i ocenu istorijata opterećenja [9]. Za svaki od navedenih delova potrebno je odrediti indekse zdravlja, kao i indeks zdravlja ET.

Težinski faktori ispitnih metoda i sistema energetskog transformatora

Indeks zdravlja transformatora treba da obuhvati ocenu stanja njegovih ključnih delova (Tabela 1). Svakom delu ET dodeljuje se težinski faktor W_d na osnovu uticaja koji ima na ukupno stanje ET. Uticaj dela ET procenjivan je i prema trenutnoj statistici mesta pojave kvara kod ET. Težinski faktori dati su na osnovu iskustva, a mogu uzeti celobrojnu vrednost od 1 do 5, kao što je prikazano u tabeli.

Tradicionalna praksa, usvojena kod nas je ispitivanje transformatorskog ulja u redovnim vremenskim intervalima.

Tabela 1 Periodika ispitivanja ulja transformatora 110 kV/X kV

Vrsta ispitivanja	Periodika (godine)
Merenje sadržaja gasova u izolacionom ulju	1
Merenje sadržaja vode u izolacionom ulju	2
Merenje sadržaja derivata furana u izolacionom ulju	2
Merenje fizičkih i hemijskih karakteristika ulja	4
Procena sadržaja vlage u čvrstoj izolaciji putem ravnotežnih dijagrama	4

Kako bi se ocenilo stanje svakog od navedenih delova ET (indeks zdravlja dela ET), koriste se različite ispitne metode. Nekim delovima pridružena je grupa odgovarajućih ispitnih metoda, pri čemu svakoj odgovara težinski faktor $W_m=[1-5]$, zavisno od toga koliko rezultati te metode mogu precizno da opišu stanje dela ET (Tabela 2). Pri tome, u proračun se unosi najniža ocena ispitne metode iz grupe.

Tabela 2. Ispitne metode i odgovarajući težinski faktori

Deo ET (fizički/nefizički)	Težinski faktor dela ET (W_s)	Ispitna metoda	Težinski faktor ispitne metode (W_m)
Magnetno kolo	3	Prazan hod pri sniženom naponu ili SFRA	-
Geometrija i el. spojevi i kontakti	4	Omske otpornosti	5
		Induktivnost usled rasipanja/SFRA	5
Čvrsta izolacija	4	Otpornost izolacije/tgδ i kapacitivnost	5
		PDC/RVM/FDS/Procena sadržaja vode u čvrstoj izolaciji na osnovu merenja sadržaja vode u ulju	4
		Analiza sadržaja derivata furana	3
Prolazni izolatori	5	tgδ i kapacitivnost	-
Teretna regulaciona preklopka	5	Omske otpornosti/dinamičko merenje otpornosti	-
Stanje aktivnog dela preko GH analize	5	Analiza sadržaja gasova u ulju	-
Izolaciono ulje	4	Fizičke, hemijske i električne osobine ulja	5
		Sadržaj vode u ulju	4
Transformatorski sud, rashladni sistem, dilatacioni sud i pomoćna oprema	2	Provera stanja rashladnog sistema i pomoćne opreme/Provera stanja komandno-signalne opreme	2
		Vizuelna kontrola/Provera curenja/Provera stanja dehidrataora	2
Istorijat rada	3	Ocena opterećenja transformatora	-

Indeksi zdravlja delova i energetskog transformatora u celini

Indeks zdravlja (IZ) jednog ET izračunava se obično na sledeći način:

$$IZ = \frac{\sum_{i=1}^n O_{di} \cdot W_{di}}{\sum_{i=1}^n W_{di}} \quad (1)$$

pri čemu je O_d ocena koju dobija svaki deo ET (indeks zdravlja dela ET) na osnovu izraza 3.2 i nalazi se u opsegu

$$0 \leq O_d \leq 3: \quad O_d = \frac{\sum_{i=1}^n O_{mi} \cdot W_{mi}}{\sum_{i=1}^n W_{mi}} \quad (2)$$

U izrazu 2 broju n odgovara broj ispitnih metoda za koje postoje primenljivi rezultati i kojima se procenjuje stanje datog sistema. Ocenu metode O_m daje stručno lice na osnovu rezultata poslednjeg i prethodnih ispitivanja, iskustava i specifičnosti pojedinih ET, a uz primenu kriterijuma datih u važećim standardima i tehničkim preporukama, i nalazi se u opsegu $0 \leq O_m \leq 3$. Ocene stanja su za električna merenja date opisno i glase: dobro, uslovno dobro, sumnjivo, loše, a za hemijska ispitivanja su A, B, C i C^* ; odnosno dobro, sumnjivo, loše i vrlo loše. Odgovarajuće ocene za proračun indeksa zdravlja su 3, 2, 1, 0, kao što je prikazano u tabeli 3.

Tabela 3 Uporedni prikaz ocena rezultata električnih i hemijskih ispitivanja sa odgovarajućim numeričkim ocenama za proračun indeksa zdravlja

Ocena rezultata ispitivanja	Odgovarajuća ocena za proračun IZ
Dobro	3
Uslovno dobro	2
Sumnjivo	1
Loše	0

S obzirom da se prilikom dijagnostike stanja koristi trostepeno ocenjivanje: „dobro“, „sumnjivo“ i „loše“, srednja ocena je u metodologiji podeljena na dve ocene: „uslovno dobro“ i „sumnjivo“. Kriterijumske vrednosti za ove dve ocene su iste, ali je razlika u tome što ocena „uslovno dobro“ ukazuje na sumnjive rezultate, ali bez većih promena tokom vremena, npr. poredeći poslednja dva-tri ispitivanja i povlači praćenje učestalijim ispitivanjem. Sa druge strane, ocena „sumnjivo“ ukazuje na rastući trend pogoršanja stanja transformatora, i povlači pooštrenu kontrolu učestalijim ispitivanjem, preporučuje dodatna ispitivanja ili pak, naglašava potrebu za planiranjem određene intervencije u predstojećem periodu.

MODIFIKOVANI INDEKS ZDRAVLJA

U dvo-hijerarhijskoj strukturi atributa, sa glavnim atributom na vrhu (ukupni indeks zdravlja) i L nižih atributa (indeks zdravlja pojedinačnih komponenti) e_i ($i = 1, \dots, L$) moguće je definisati skup nižih atributa na sledeći način:

$$E = \{e_1, \dots, e_i, \dots, e_L\}. \quad (3)$$

Težinski faktori pojedinačnih atributa predstavljeni su skupom $\omega = \{\omega_1, \dots, \omega_i, \dots, \omega_L\}$ gde je ω_i relativna težina atributa i -tog nivoa (e_i) sa vrednostima između 0 i 1 ($0 \leq \omega_i \leq 1$). Stepeni indeksa zdravlja predstavljeni su kao

$$H = \{H_1, \dots, H_n, \dots, H_N\}, \quad (4)$$

U našem slučaju, ove ocene odgovaraju stepenima navedenim u Tabeli 3.

Ocena i - tog osnovnog atributa e_i onda može da bude predstavljena sledećom raspodelom:

$$S(e_i) = \{(H_n, \beta_{n,i}), n = 1, \dots, N\} \quad i = 1, \dots, L; \quad (5)$$

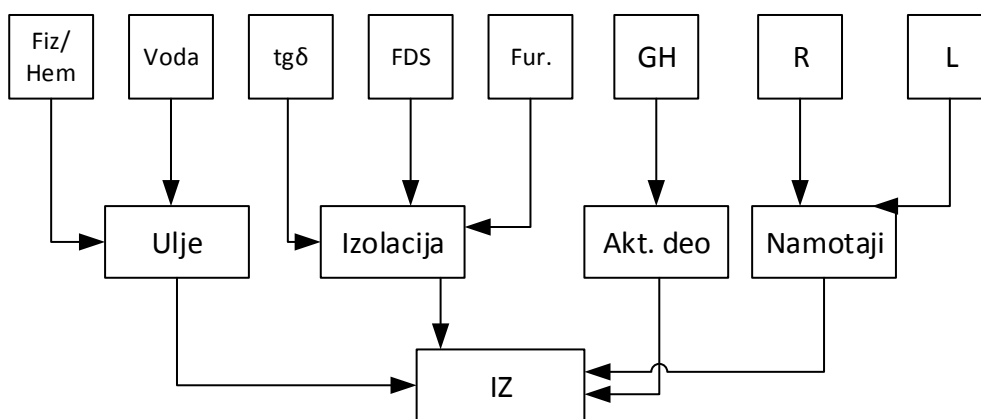
Raspodela verovatnoća da će ET biti u pojedinim stanjima računa se na sledeći način:

$$m_{n,i} = \omega_i \beta_{n,i} \quad n=1, \dots, N; \quad (6)$$

Preostala verovatnoća je onda:

$$m_{H,i} = 1 - \sum_{n=1}^N m_{n,i} = 1 - \omega_i \sum_{n=1}^N \beta_{n,i} \quad (7)$$

Kompletan matematički prikaz metodologije prevazilazi obim ovog članka, ali će biti prikazan ilustrativni primer ocene postojećeg transformatora 110/35/10 kV, 20/20/10MVA instalisanog u EPS-u. Polazeći od kompletnog modela datog u tabelama 2 i 3, redukovani model za ocenu stanja transformatora prikazan je na slici 1.



Slika 1 Hijerarhijska šema ocene indeksa zdravlja

Ocene stanja transformatora 110/35/10 kV prikupljene su tokom redovnih ispitivanja i aktivnosti na održavanju i predstavljene u tabeli. Rezultati fizičko/hemijskih ispitivanja, kao i merenja aktivne otpornosti i induktivnosti rasipanja stari su 2 godine.

Tabela 4 Ocena transformatora korišćenjem običnog IZ

	Ulje		Izolacija			Aktivni deo	Namotaji	
W_d	4		4			5	4	
W_m	5	4	5	4	3		5	5
	<i>Fiz/hem.</i>	H_2O	$tg\delta$	<i>FDS</i>	<i>Furan</i>	<i>DGA</i>	<i>R</i>	<i>L</i>
O_m	3	2	1	-	3	2	3	3
IZ	2,56		1,75			2	3	

Korišćenjem uobičajenog izraza za računanje IZ, ocena indeksa zdravlja za ceo ET iznosi:

$$IZ = \frac{\sum_i^n O_{di} \cdot W_{di}}{\sum_i^n W_{di}} = \frac{4 \cdot 2,56 + 4 \cdot 1,75 + 5 \cdot 2 + 4 \cdot 3}{17} = 2,3 \quad (8)$$

Kako su merenja vršena u različitim vremenskim periodima, ne možemo sa sigurnošću da tvrdimo da prilikom rangiranja ET zadržava iste ocene za pojedine komponente. U slučaju ovog transformatora, različiti nivoi poverenja u stanje transformatora potiču od različitih vremena ispitivanja. Ova vrednost predstavlja nivo poverenja u određene rezultate, odnosno predstavlja uverenje da neki atribut zadovoljava određeni nivo. Na primer, zbog nepostojanja FDS testova, sve vrednosti stepena poverenja su jednke nuli.

U Tabeli 5 prikazane su početne vrednosti stepena poverenja za transformator. Težinski faktori za komponente transformatora (W_i) i metode ispitivanja (W_m) takođe su prikazane u tabeli, ali su normalizovani.

Tabela 5. Početne vrednosti poverenja za određena stanja

	Ulje		Čvrsta izolacija			Aktivni deo	Namotaji	
W_d	0,24		0,24			0,28	0,24	
W_m	0,55	0,45	0,41	0,34	0,25		0,5	0,5
H_i	Fiz/hem ($\beta_{i,1}$)	H ₂ O ($\beta_{i,2}$)	tg δ ($\beta_{i,1}$)	FDS ($\beta_{i,2}$)	Furan ($\beta_{i,3}$)	GH (β_i)	R ($\beta_{i,1}$)	L ($\beta_{i,2}$)
3	0,5	0	0	0	0,8	0	0,5	0,5
2	0,5	0,8	0	0	0	0,9	0,3	0,3
1	0	0,2	0,8	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Korišćenjem rekurzivne metode za pojedinačne komponente transformatora, vrednosti verovatnoća za određena stanja m_{ij} predstavljena su u Tabeli 6. Na primer, verovatnoća da je ulje u stanju H3="dobro" iznosi $m_3=0,17$, H2="uslovno dobro" $m_2=0,44$, H1="sumnjivo" $m_1=0,045$ i H0="loše" $m_0=0$.

Tabela 6. Vrednosti verovatnoća stepena poverenja za pojedinačne komponente

H_i	3	2	1	0	m_{Hj}
m_{ij}					
Ulje	0,17	0,44	0,045	0	034
Izolacija	0,062	0	0,14	0	0,8
Aktivni deo	0	0,252	0	0	0,748
Namotaji	0,153	0,07	0	0	0,777

Korišćenjem rekurzivne metode, sa vrednostima izračunatim u prethodnom koraku, dobijamo kombinovane stepene poverenja za stanja H3="dobar", H2="uslovno dobar", H1="sumnjiv" sa vrednostima 0,32; 0,175 i 0,08 respektivno. Koristeći tradicionalnu metodu izračunavanja IZ, transformator se ocenjuje kao „umereno dobar“ (Tabela 3). ER metodologija, međutim, daje distribuciju stanja verovanja, sa 0,44 stepena verovanja da je transformator u umereno dobrom stanju, i značajnu vrednost da transformator može biti u boljem stanju (0,17). Prema trenutnoj praksi u EPS-u, klasifikacija transformatora u kategoriju 2 znači da bi trebalo češće obavljati inspekciju, što rezultira povećanim troškovima i neisporučenom energijom. Daljnja istraživanja će biti usredsređena na procenu finansijskih gubitaka nastalih usled prekida u snabdevanju električnom energijom koji može biti prouzrokovan padom ET-a.

ZAKLJUČAK

Izračunavanje indeksa zdravstvenog stanja transformatora predstavlja izuzetno korisno sredstvo za upravljanje ukupnim resursima jedne distribucije, analizu trenutnog stanja transformatora u mreži i planiranje preventivnog održavanja. Ovaj indeks daje procenu statusa transformatora, što omogućava obavljanje uporedne analize između pojedinih transformatora, delova distributivnog sistema, i postavljanje prioriteta i adekvatno kanalsanje finansijskih sredstava i planiranje korektivnih mera za poboljšanje. Metodologija predstavljena u radu koristi ER pristup koji je jedno od najnovijih dostignuća u donošenju odluka sa više kriterijuma, a koji se primenjuje za prioritizaciju ET-a prema njihovom stanju. Metodologija se pokazala vrlo korisnom u oblasti pouzdanosti i stabilnosti distributivnog sistema, a dalja istraživanja biće usmerena na procenu finansijskih gubitaka nastalih zbog prekida u snabdevanju električnom energijom koje može izazvati prekid rad, ili sa druge strane, prečesta ispitivanja ET.

LITERATURA

1. Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Formiranje metodologije za analizu i smanjenje rizika eksploatacije 110 kV transformatora u distributivnoj mreži. Studija za potrebe JP EPS, 2016.
2. Ali Naderian Jahromi, Ray Piercy, Stephen Cress, Jim R. R. Service, Wang Fan, (2009) "An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index", IEEE Electrical Insulation Magazine 25(2):20 – 34
3. Gorgan B, Notingher PV, Badicu VL, Tanasescu G, Calculation of power transformers health indexes, Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series, 2010 no. 34, pp. 13-18,
4. J. Ponočko, J. Lazić i dr. Indeks zdravlja kao deo upravljanja resursima u oblasti energetskih transformatora, Savetovanje CIGRE Srbija, 2017.
5. TP 15 Obim i učestanost radova na održavanju EEO, Novembar 2012, JP EPS
6. Shafer GA (1976) "Mathematical theory of evidence". Princeton University Press, Princeton
7. E. Duarte, D. Falla, J. Gavin, M. Lawrence, T. McGrail, D. Miller, P. Prout, B. Rogan, "A Practical Approach to Condition and Risk Based Power Transformer Asset Replacement", IEEE, 2010
8. F. Scatiggio, A. Fraioli, V. Iuliani, M. Pompili, "Health Index: the TERNAs Practical Approach for Transformers Fleet Management", CIGRE, Paris, 2014
9. Nick Dominelli et al. "Equipment health rating of power transformers", Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation IEEE, Sep 2004