

Vreme reverberacije energetskog transformatora

Miloš Bjelić, Bogdan Brković, Mileta Žarković, Tatjana Miljković

Apstrakt— Energetski transformator je uz generator jedan od najvažnijih elemenata elektroenergetskih sistema. Pouzdanost rada energetskog transformatora direktno je povezana sa njegovim stanjem. Analiza rezultata ispitivanja svodi se na vizuelno poređenje frekvencijskih odziva periodičnih merenja transformatora, dobijenih pomoću specijalizovanih uređaja. Nedostatak ove metode je oslanjanje na inženjersko iskustvo. Objektivniji način detekcije kvarova je izračunavanje matematičkih indikatora zasnovanih na analizi frekvencijskog odziva. Ovi parametri često nisu u stanju da nedvosmisleno ukažu na stepen kvara. Ovaj rad predstavlja novi pristup za otkrivanje unutrašnjih kratkih spojeva transformatora. Predlaže se novi indikator zasnovan na vremenu reverberacije, koje se uobičajno koristi u akustici. Predloženi parametar zasnovan je na proračunu u vremenskom domenu i omogućava pouzdanu detekciju kratkih spojeva transformatora i tačnu procenu njihovog stepena.

Ključne reči — Detekcija kvara, energetski transformator, indikator, obrada signala, vreme reverberacije.

I. UVOD

Energetski transformator (u daljem tekstu ET) je jedan od najvažnijih i najskupljih elemenata u svakom delu i na svakom nivou napona elektroenergetskog sistema. Pored toga, ET je izuzetno složena komponenta na čiji rad utiču termički, mehanički, električni i hemijski procesi. Neki od ključnih delova transformatora koji su od velike važnosti za njegov pouzdan rad su: magnetni krug, ulje, namotaji (stanje geometrije i stanje električnih veza) i čvrsta izolacija namotaja. Deformacije namotaja obično se otkrivaju metodom analize frekvencijskog odziva (FRA) i *sweep* analizom frekvencijskog odziva (SFRA). Standardna SFRA metoda uključuje poređenje frekvencijskih odgovora uzastopnih periodično sprovedenih testova. Ako se dva uzastopna frekvencijska odziva ne razlikuju, tada se uzdužni parametri R , L i C nisu značajno promenili, što ukazuje da u međuvremenu nije došlo do deformacija namotaja.

U radovima i standardima [1-14] predstavljene su FRA i SFRA metoda i njihov značaj u praćenju i dijagnostici stanja ET. Referenca [1] predstavlja teorijske osnove FRA metode.

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Bogdan Brković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: brkovic@etf.rs).

Mileta Žarković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: mileta@etf.rs).

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.rs).

Razvoj akustičkih metoda pomoću vibracija predstavljen je u [2], gde je pokušano da se rezultati FRA metode dopune i povežu sa postojećim IEEE standardima [3], IEC standardom [4] i iskustvom radne grupe CIGRE [5, 6]. Dobra interpretacija rezultata FRA metode predstavljena je u [7], gde je pokušano da se odrede pojedinačni indikatori i njihove približne granične vrednosti. Metoda koja grupiše rezultate simulacije FRA metode i povezuje ih sa određenom vrstom kvara predstavljena je u [8]. Eksperimenti na ET u praznom hodu i uslovima kratkog spoja, uz primenu FRA metode predstavljeni su u [9, 10]. Detekcija radijalnih deformacija namota pomoću impulsnog napona groma prisutna je u [11]. Uobičajeni statistički indikatori kvarova dati su u [12-14]. U članku [15] je predstavljena nova metodologija za dijagnostiku kvara ET, zasnovana na rezultatima SFRA. Ova metoda upoređena je sa metodom konačnih elemenata pri otkrivanju unutrašnjih i spoljnih kvarova kratkog spoja [16].

Tumačenje rezultata SFRA obično se vrši vizualizacijom slika generisanih od strane specijalizovanih uređaja za takva ispitivanja. Razvoj novih metoda motivisan je potrebom za postizanjem objektivne interpretacije rezultata. Ovaj rad prikazuje neke najčešće korišćene identifikatore koji se primenjuju na dobijene SFRA testove. Takvi identifikatori trebali bi jasnije da kvantifikuju rezultata SFRA metode i omogućiti lakše i nedvosmisleno otkrivanje oštećenja namotaja ET i kvarova magnetnog kruga.

U ovom radu predložena je detekcija kratkih spojeva i određivanje njihove težine vrši se na osnovu vremena reverberacije [17]. Ovaj parametar se najčešće koristi za analizu akustike prostorija. Glavna hipoteza istraživanja u ovom radu je da se broj kratko spojenih namotaja može odrediti na osnovu vrednosti vremena reverberacije. Realizovani eksperimenti obuhvatili su testiranje sa kratkim spojem različitih delova namotaja jednog ET. Merenja su sproveda pomoću audio kartice. Snimljeni signali se koriste za izračunavanje statističkih parametara koji se obično koriste u literaturi za detekciju kvarova ET. Izvršeno je poređenje između vremena reverberacije i postojećih parametara u pogledu osetljivosti na dužinu kratkih spojeva.

Rad je organizovan na sledeći način. U odeljku 2 dat je pregled najznačajnijih metoda i statističkih parametara koji se koriste za ET dijagnostiku. U ovom poglavlju objašnjen je postupak izračunavanja vremena reverberacije. Eksperimentalna postavka opisana je u poglavlju 3. Rezultati dobijeni korišćenjem zvučne kartice prikazani su u poglavlju 4. Zaključci istraživanja dati su u poglavlju 5.

II. METODOLOGIJA

A. FRA i SFRA analiza

U svrhu otkrivanja mehaničkih kvarova ET, mogu se koristiti različiti ulazni signali:

- odskočni signal (FRA analiza),
- sweep signal (SFRA analiza).

Kada se ET terminal pobudi sa nekim od ulaznih signala, meri se odziv na izlazu ET. U ovim merenjima, namotaj ET može se posmatrati kao dvopolna mreža koja sadrži otpornike, kondenzatore i kalemове, gde je otpor obično zanemarljiv. Ako se dva upoređena frekventijska odziva (periodična testiranja transformatora) ne razlikuju, to znači da se parametri nisu značajno promenili, tj. nije bilo deformacija namotaja od prethodnog merenja. U slučaju mehaničkih oštećenja namotaja, vrednosti ekvivalentnih kondenzatora i kalemova se menjaju, pa se odzivi dva periodična ispitivanja se razlikuju, što ukazuje na kvar. Frekventijski odziv $H(j\omega)$ se formira kao odnos Furijeove transformacije izlaznog signala V_{output} i Furijeove transformacije ulaznog signala V_{input} :

$$H(j\omega) = \frac{V_{output}(j\omega)}{V_{input}(j\omega)}. \quad (1)$$

Za analizu se najčešće koristi samo amplitudska karakteristika frekventijskog odziva. Ordinata predstavlja amplitudu u decibelima, a apscisa predstavlja frekvenciju na logaritamskoj skali. Ovaj postupak prelaska u frekventijski domen u velikoj meri olakšava analizu i pruža nezavisnost od talasnog oblika pobude. Međutim, to povećava računsku i vremensku kompleksnost samog potapka. Poređenjem izračunatih frekventijskih odziva u uzastopnim ispitivanjima mogu se otkriti različite promene u geometriji namotaja i promene u magnetnom kolu ET. Tumačenje rezultata SFRA oslanja se na ličnu stručnost i može dovesti do različitih zaključaka. Štaviše, konvencionalni SFRA *fingerprint* vrlo je neprecizan u otkrivanju početnih i niskih nivoa mehaničkih kvarova [13]. Da bi se rešili ovi problemi, predloženi su različiti statistički indikatori [6, 12, 13, 14]. Neki od ovih indikatora definisani su u tabeli I. Analiza osetljivosti indikatora može se izvršiti izračunavanjem njihovih vrednosti za različite intenzitete kvara.

TABELA I
KORIŠĆENI STATISTIČKI INDIKATORI IZ LITERATURE

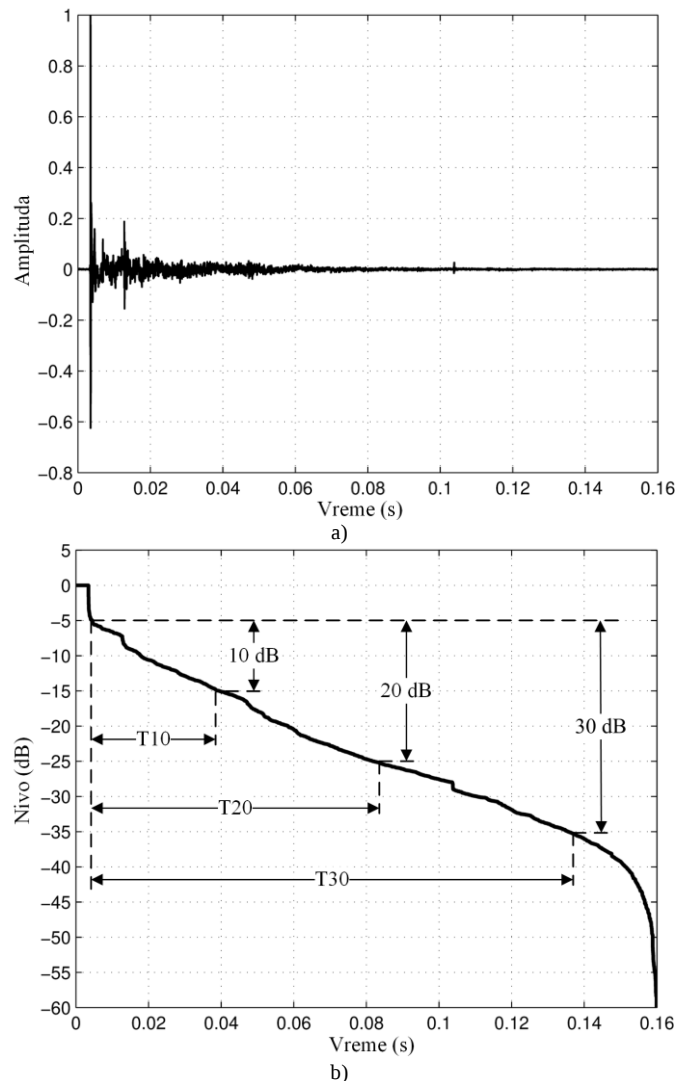
Indikator	Opis
Jaccard Distance (JD)	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$
Absolute sum of logarithmic error (ASLE)	$\frac{\sum_{i=1}^N 20 \log_{10}(y_i) - 20 \log_{10}(x_i) }{N}$
Absolute average difference (DABS)	$\frac{\sum_{i=1}^N y_i - x_i }{N}$

(N – ukupan broj podataka; x_i i y_i – ulazni, odnosno izlazni podaci; $\bar{x}$ i $\bar{y}$ – srednje vrednosti)

B. Vreme reverberacije

Linearni vremenski invarijantni sistem (LTI) može se jednoznačno opisati frekventijskim odzivom ili impulsnim odzivom u vremenskom domenu [18]. Frekventijski odziv sistema se dobija primenom Furijeove transformacije na impulsnim odziv u vremenskom domenu. Impulsnim odziv se može dobiti pobuđivanjem sistema Dirakovim impulsom. Međutim, generisanje Dirakovog impulsa u praksi nije moguće, pa se umesto toga moguće koriste jedinični impuls. Češće se koriste indirektno metode kao što su sweep signal (*chirp*) i MLS sekvenca [19]. Impulsnim odziv se obično koristi u oblastima obrade signala, automatskog upravljanja i akustike.

Impulsnim odziv prostorije meri se pomoću zvučnika i mikrofona. Soba se može posmatrati kao LTI sistem, gde signal mikrofona predstavlja izlaz sistema, a signal koji se emituje iz zvučnika predstavlja ulaz sistema. Impulsnim odziv prostorije predstavlja njenu „ličnu kartu“, jer omogućava određivanje gotovo svih akustičkih parametara prostorije. Primer impulsnog odziva prostorije prikazan je na slici 1 a.



Sl. 1. Određivanje vremena reverberacije za prostoriju: a) Impulsnim odziv, b) Kriva opadanja i princip određivanja T10, T20 i T30

Struktura impulsnog odziva je vrlo složena i njegov talasni oblik ne pruža mnogo informacija o prostoriji. Zvučno polje obično se može analizirati jednostavnim posmatranjem globalnog oblika impulsnog odziva. Zbog toga se impulсни odziv najčešće karakteriše tzv. krivom opadanja zvuka (reverberaciona kriva) [17]. Da bi se smanjio uticaj fluktuacija krive, koristi se tzv. integrisani impulсни odziv, poznat i kao *Schroeder*-ova kriva [17]. Ovaj pristup zasnovan je na uvođenju krive opadanja $L_R(t)$, definisane kao:

$$L_R(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt = \int_0^{\infty} h^2(t) dt - \int_0^t h^2(t) dt, \quad (2)$$

gde je $h(t)$ impulсни odziv. Na slici 1 b) prikazana je kriva opadanja impulsnog odziva, prikazanog na slici 1 a.

Najčešće korišćeni parametar u akustici prostoriji je vreme reverberacija (u oznaci T60). Vreme reverberacije je definisano kao vreme potrebno da se kriva reverberacije smanji za 60 dB od početne vrednosti, što odgovara smanjenju od milion puta na linearnoj skali. Može se smatrati da nakon vremena reverberacije u sobi nema zvučne energije. Dinamiku od 60 dB je teško postići u praksi, zbog čega se T60 određuje indirektno pomoću parametara T10, T20 ili T30. Tumačenje ovih parametara ilustrovano je na slici 1 b [17]. Vreme reverberacije T60 izračunava se množenjem T30 sa dva, T20 sa tri ili T10 sa šest.

U ovom radu se ispituje mogućnost korišćenja vremena reverberacije kao indikatora za određivanje stanja ET. Za razliku od akustike prostorije, gde su pobuda i impulсни zvučni signali (zvučni pritisak), pobuda i impulсни odziv ET-a su električni signali (napon odnosno struja). Iako su izmerene veličine različite prirode, princip izračunavanja vremena odjeka važi u oba fizička domena. U opštijem smislu, vreme reverberacije može se tumačiti kao vreme smirivanja impulsnog odziva.

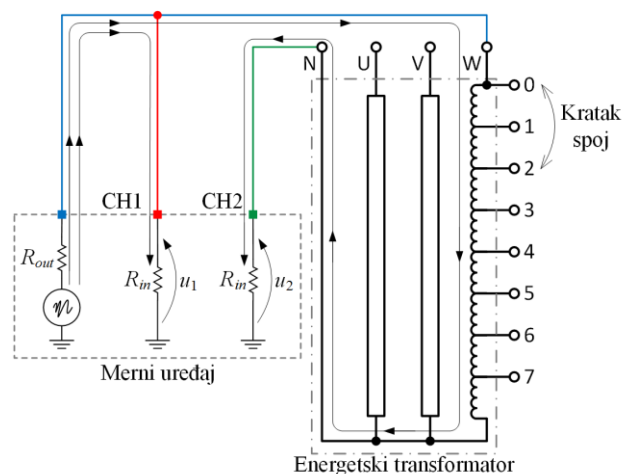
III. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Eksperimentalna postavka je šematski prikazana na slici 2. ET koji se koristi u postavci je proizveden u Laboratoriji za visoki napon Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Parametri transformatora dati su u tabeli II.

TABELA II
PARAMETRI KORIŠĆENOG ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Parametar	Vrednost
Nazivni napon	10/0.4 kV/kV
Nazivna struja	23/557 A/A
Frekvencija	50 Hz
Tip veze	Yyn0
Broj faza	3

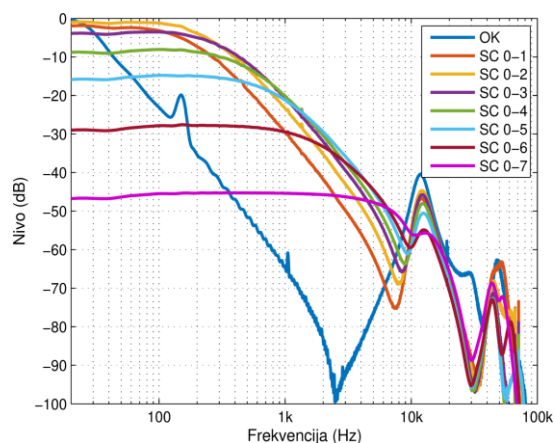
Ovaj ET ima sedam dvostrukih namotaja za pristupačnim kontaktima na namotaju faze W, označenim sa 0 do 7 na slici 2. Takva konstrukcija omogućava kratki spoj različitih delova namotaja. U zavisnosti od veza između ovih kontakata, stepen kvara može se menjati, pri čemu kratki spojevi između susednih kontakata odgovaraju najmanjem, a kratki spoj između kontakata 0 i 7 odgovaraju najvećem stepenu kvara.



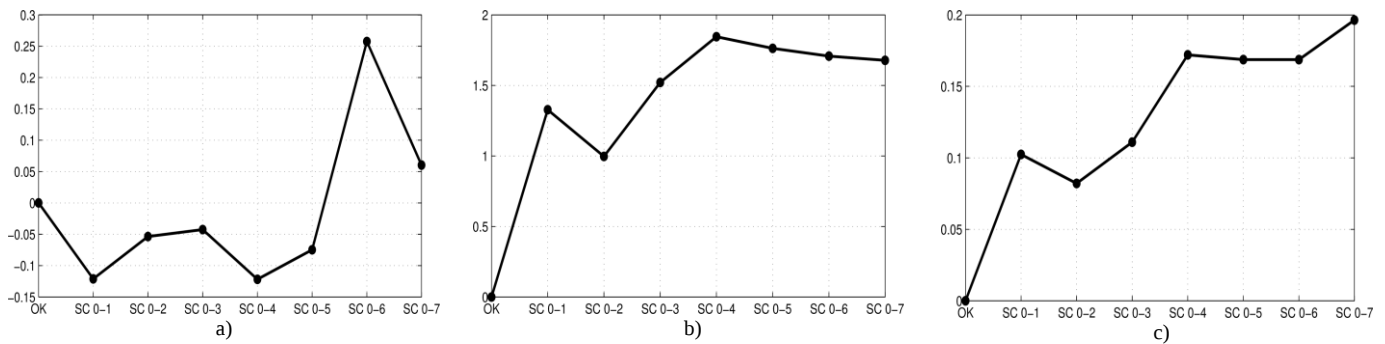
Sl. 2. Šematski prikaz eksperimentalne postavke

Fazni W namotaj se pobuđuje pomoću izvora promenljive frekvencije (plava linija). Ulazni napon (u_1) meri se između faze W i zemlje (Kanal 1 - crvena linija). Napon koji odgovara odzivu (u_2) se meri između neutralne tačke transformatora i zemlje (Kanal 2 - zelena linija). Na osnovu ova dva merenja može se dobiti frekventijski odziv namotaja. Putanje struja u kolu su označene crnim linijama sa strelicama koje pokazuju smer struje.

Ukupno je izvršeno osam merenja pomoću svakog, jedno na zdravom ET (označeno sa OK) i sedam na neispravnom ET (označeno kao SC – *Short Circuit*). Kvarovi su nastajali formiranjem kratkog spoja između kontakta 0 i kontakata 1 do 7 (videti sliku 2). Na taj način formirani su kvarovi različite težine. Pobudni signal je bio logaritamski *sweep* signal. Kao merni uređaj korišćena je audio kartica Steinberg UR22 [21]. Ovaj uređaj predstavlja eksternu zvučnu karticu koja se obično koristi za snimanje audio signala. Cena uređaja je oko 150\$, što je nekoliko redova veličine niže u poređenju sa profesionalnim SFRA analizatorom. Vreme potrebno za jedno merenje je oko 10 s. Maksimalna frekvencija odabiranja zvučne kartice je 192 kHz. Na osnovu toga ovaj uređaj omogućava merenje frekventijskog odziva u opsegu od 20 Hz do oko 100 kHz. Merenje je realizovano korišćenjem aplikacije, realizovane u programskom paketu Matlab.



Sl. 3. Frekventijski odziv dobijen pomoću audio kartice



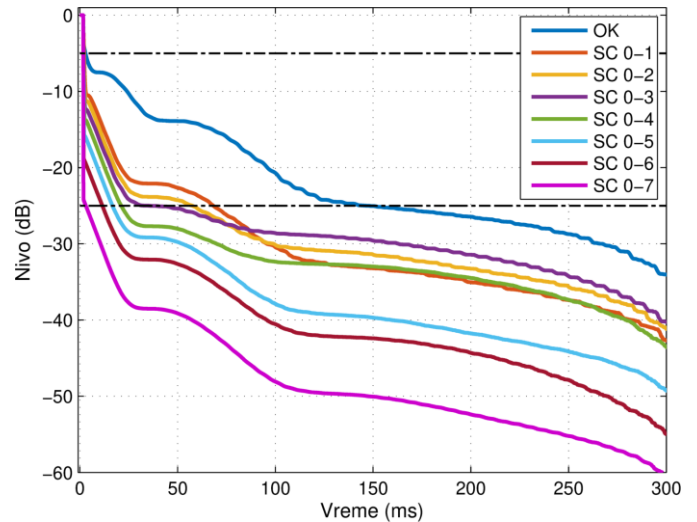
Sl. 4. Statistički indikatori (tabela I): a) Jaccard Distance (JD); b) Absolute sum of logarithmic error (ASLE); c) Absolute average difference (DABS)

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

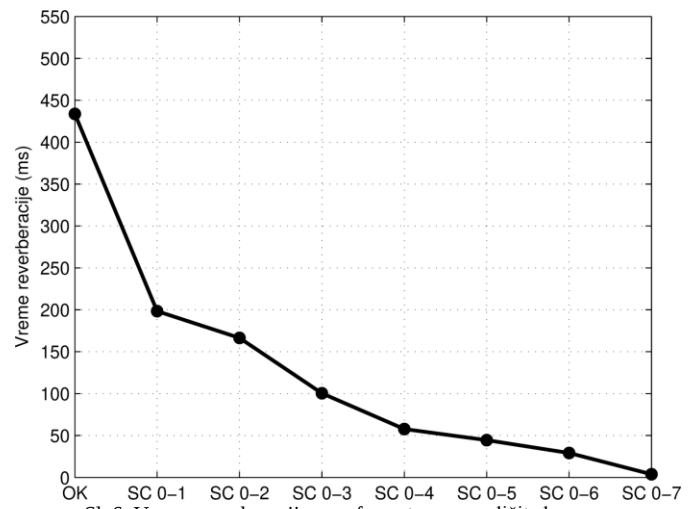
Frekventijski odziv ET-a sa zdravim namotajem (plava boja) i sa kratkim spojevima (druge boje) prikazani su na slici 3. Povećani nivo u frekventijskom odzivu primećuje se kada su prisutni kvarovi na transformatoru, što se može pripisati promenjenim vrednostima parametara namotaja (induktivnosti i kapaciteta). ET se može tretirati kao složena RLC mreža, sa kratkim spojevima koji utiču na ekvivalentnu impedansu namotaja [22]. Ovaj efekat je najizraženiji na niskim frekvencijama kada su dominantne induktivnosti namotaja. Smanjenje impedanse namotaja dovodi do povećanja napona na CH2 (slika 2), povećavajući tako frekventijski odziv. Rezonantna frekvencija zadržava vrednost od oko 10 kHz bez obzira na stanje namotaja. Frekventijski odzivi sa slike 3 dobijeni su korišćenjem izmerenih signala iz kanala 1 (pobuda) i kanala 2 (odziv). Na osnovu ovih signala izračunavaju se statistički pokazatelji definisani u tabeli I. Izračunate vrednosti su prikazane na slici 4 za sve analizirane slučajeve.

Vrednosti parametra JD date su na slici 4 a. Ovaj indikator je jednak 0 za zdrav ET i kreće se od -0.13 do 0.25 kada su prisutni kratki spojevi na namotaju ET. Na osnovu vrednosti ovog indikatora ne može se utvrditi da li na ET postoji kvar. Jasno je da se onda ne može utvrditi ni stepen kvara, odnosno dužina namotaja koja je u kratkom spoju. Indikatori ASLE i DABS jasno ukazuju na kratak spoj namotaja ET. To omogućava vrlo pouzdano otkrivanje kvara. Kao što je vidljivo sa slike 4 b i c, nijedan od dva indikatora se ne menja monotonno, pa se stepen kvara ne može pouzdano utvrditi. Ipak, ova dva indikatora imaju očiglednu prednost u poređenju sa JD indikatorom prikazanim na slici 4 a. Oni pružaju najpouzdaniju detekciju kvara i mogu u određenoj meri ukazati na ozbiljnost kvara.

Impulсни odziv ET (tj. namotaja) izračunat je za svaki eksperiment na osnovu snimljenih ulaznih i izlaznih signala. Krive opadanja nivoa signala, koje odgovaraju svim analiziranim scenarijima, dobijaju se na osnovu izraza (3), koristeći izračunate impulsne odzive. Krive opadanja integrisanog impulsnog odziva prikazane su na slici 5. Sve krive pokazuju slično ponašanje tokom prvih 15 ms. Nakon ovog intervala, kriva koja odgovara ispravnom transformatoru sporije opada u odnosu na krive koje odgovaraju ET sa kvarom. Kako se ozbiljnost kvara, tj. broj kratko spojenih navojaka, povećava tako se povećava i nagib krivih opadanja.



Sl. 5. Krive opadanja impulsnih odziva transformatora



Sl. 6. Vreme reverberacije transformatora za različite kvarove

Vreme reverberacije (T60) izračunato je prema slici 2 b. Za izračunavanje T60 korišćen je dinamički opseg od 20 dB, tj. parametar T20. Vrednosti vremena reverberacije dobijene za ispravan ET i analizirane kvarove prikazane su na slici 6. Vrednost T60 za zdrav ET je 434 ms. Kada je prisutan najmanji kvar (slučaj SC 0-1), T60 se smanjuje na 198 ms, što je smanjenje od 55% u poređenju sa ispravnim stanjem. Vrednosti T60 se kreću od 4 ms za najteži kvar (SC 0-7) do 166.5 ms za slučaj kvara SC 0-2. Značajno smanjenje T60 prilikom postojanja kvara omogućava vrlo pouzdano

otkrivanje kvara. Dalje, T60 se monotono smanjuje kako se povećava stepen kratkog spoja. Ovo daje predloženom parametru izrazitu prednost u odnosu na postojeće parametre zasnovane na SFRA u pogledu njegove sposobnosti da jasno ukaže na ozbiljnost kvara.

Upotreba zvučne kartice kao mernog uređaja umesto specijalizovanih SFRA analizatora je povoljnija pre svega u pogledu cene. Međutim, njena prednost nad SFR analizatorom je i u pogledu individualnog trajanja merenja. Trajanje merenja je oko 5 sekundi prilikom korišćenja zvučne kartice u poređenju sa 2 minuta prilikom korišćenja SFR analizatora. Sprovođenjem SFR analize i izračunavanjem predloženog indikatora (vreme reverberacije - T60) pomoću zvučne kartice može se izvršiti pouzdano otkrivanje kvarova i njihova kvantifikacija. Rezultati prikazani u ovom radu jasno ukazuju da primena predložene procedure pomoću jednostavnog audio uređaja obezbeđuje nedvosmisleni indikaciju kvarova energetskog transformatora.

V. ZAKLJUČAK

Vreme reverberacije (T60) predloženo je u ovom radu kao novi parametar za detekciju kvara energetskog transformatora. Iako se pretežno koristi u akustici prostorija, vreme reverberacije (T60) u opštijem smislu predstavlja vreme potrebno da se impulsni odziv sistema smiri. Glavna prednost ovog parametra je što njegovo izračunavanje zahteva samo talasne oblike u vremenskom domenu ulaznog i izlaznog signala. Profesionalni SFRA analizatori vrše izračunavanja u frekvencijskom domenu, pa je predloženi postupak proračuna jednostavniji. Realizovani eksperimenti pokazuju sposobnost novog parametra da ukazuje na prisustvo kvara unutrašnjeg namotaja i njegovu težinu, tj. broj kratko spojenih navojaka. Pored toga, predloženi parametar ima prednost u odnosu na postojeće statističke pokazatelje zasnovane na SFRA, posebno u pogledu određivanja težine kvara. Novi indikator T60 jasno ukazuje na različite tipove grešaka bez složenih matematičkih operacija.

Za realizaciju eksperimenata korišćena je audio kartica. S obzirom na svoj jednostavniji dizajn, znatno nižu cenu i kraće vreme potrebno za merenje i obradu signala, zvučna kartica predstavlja vrlo korisnu alternativu profesionalnim SFRA analizatorima za preliminarnu dijagnostiku ET.

Budući rad biće usmeren na korišćenje vremena reverberacije za otkrivanje drugih vrsta unutrašnjih kvarova energetskog transformatora, poput deformacija namotaja. Takođe će se ispitati mogućnost korišćenja predloženog parametra za praćenje starenja energetskog transformatora.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 i projekta III 42009, koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] S. Ghani, Y. Thayoob, Y. Ghazali, M. Khiar, I. Chairul, Distribution system performance evaluation accounting for data uncertainty, *Procedia Engineering*, vol.68, pp 469-476, 2013.
- [2] E. Kornatowski, S. Banaszak, Diagnostics of a Transformer's Active Part with Complementary FRA and VM Measurements, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 3, Berlin, pp 1398-1406, 2014.
- [3] IEEE PC57.149/D8, Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers, 2012.
- [4] IEC 60076-18, Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response, 2012.
- [5] CIGRE Working Group A2.26, "Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis", 2008.
- [6] CIGRE Working Group A2.53 "Advances in the interpretation of transformer Frequency Response Analysis (FRA)", Reference 812, SeETember, 2020.
- [7] J.R. Secue, E. Mombello, Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power transformers, *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1119-1128, 2008
- [8] A. Abbasi, M. Mahmoudi, Diagnosis and Clustering of Power Transformer Winding Fault Types by Cross-Correlation and Clustering Analysis of FRA Results, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol: 12, pp. 4301-4309, 2018.
- [9] A. Pandya, B. Parekh, Interpretation of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) trace for the open circuit and short circuit winding fault damages of the power transformer, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 62, pp. 890-896, 2014.
- [10] Akshay A. Pandya, B.R. Parekh, Interpretation of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) traces for the open circuit and short circuit winding fault damages of the power transformer, vol. 62, pp. 890-896, 2014.
- [11] Jian Sun, Qing Yang, Peiyu Su, Shilin Wu, Song Chen, Lewei He, Diagnosis of winding fault in three-winding transformer using lightning impulse voltage, *Electric Power Systems Research*, vol. 175, pp. 1-9, 2019.
- [12] Ni Jianqiang, Zhao Zhongyong, Tan Shan, Chen Yu, Yao Chenguo, Tang Chao, The actual measurement and analysis of transformer winding deformation fault degrees by FRA using mathematical indicators, *Electric Power Systems Research*, vol. 184, pp. 1-11, 2020.
- [13] Ali Reza Abbasi, Mohammad Reza Mahmoudi, Application of statistical control charts to discriminate transformer winding defects, *Electric Power Systems Research*, vol. 191, pp. 1-11, 2021.
- [14] Reza Khalili Senobari, Javad Sadeh, Hossein Borsi, Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review, vol. 155, pp. 172-183, 2018.
- [15] Janneth R. Secue, Enrique E. Mombello, New SFRA measurement interpretation methodology for the diagnosis of power transformers, *Electrical Engineering*, vol. 96, pp. 183-198, 2014.
- [16] Hossein Ahmadi, Behrooz Vahidi, Amin Foroughi Nematollahi, A simple method to detect internal and external short-circuit faults, classify and locate different internal faults in transformers, *Electrical Engineering*, vol. 96, pp. 183-198, 2014.
- [17] M. R. Schroeder, New Method of Measuring Reverberation Time, *The Journal of the Acoustical Society of America* 37(6):409-412, March 1965, DOI: 10.1121/1.1909343.
- [18] A Papoulis, *Circuits and Systems: A Modern Approach*, Oxford University Press. June 8, 1995.
- [19] G.V. Stan, J. J. Embrechts, D. Archambeau, Comparison of different impulse response measurement techniques, *Journal of the Audio Engineering Society* 50(4):249-262, April 2002,
- [20] Tehnička dokumentacija proizvođača Doble M5400 SFRA Analyzer, dostupno na: <https://www.doble.com/product/m5400/>, pristupano 19.6.2021.
- [21] Tehnička dokumentacija proizvođača UR22 Sound Card, dostupno na http://download.steinberg.net/downloads_hardware/UR22/UR22_documentation/UR22_OperationManual_en.pdf, pristupano 19.6.2021.
- [22] S. M. Al-Ameri, M. S. Kamarudin, S. Muhammad, et. al., Interpretation of Frequency Response Analysis for Fault Detection in Power Transformers, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 7, 2021.

ABSTRACT

The power transformer and generator are two of the vital elements of electric power systems. The reliability of the power transformer is directly related to its condition. The analysis of the results is based on a visual comparison of the frequency responses of periodic tests of transformers, obtained with the help of specialized devices. The disadvantage of this method is the weakening of the engineering experience. An objective way to detect faults is to calculate mathematical indicators based on frequency response analysis. These parameters are often not able to unambiguously indicate the degree of failure. This paper presents a new approach for detecting internal

short circuits of transformers. A new indicator based on the reverberation time, commonly employed in acoustics, is proposed instead. The proposed parameter is based on time-domain calculation and enables reliable detection of transformer inter-turn short circuits and accurate estimation of their degree.

Power Transformer Reverberation Time

Miloš Bjelić, Bogdan Brković, Mileta Žarković, Tatjana
Miljković