

Analiza interakcije ulaznih parametara pri određivanju lokacije parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru akustičkom metodom

Vladimir Poluzanski, Boško Nikolić
Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
vladimir.poluzanski@ieent.org

Dragan Kovačević
Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički institut Nikola Tesla
Beograd, Srbija

Uroš Kovačević
Univerzitet u Beogradu, Mašinski
fakultet
Beograd, Srbija

Sadržaj—Cilj ovog rada je da kroz analizu osetljivosti merenja poveća razumevanje odnosa između parametara matematičkog modela koji se koristi za proračun lokacije parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru akustičkom metodom. Analizirana je osetljivost algoritma za proračun lokacije parcijalnih pražnjenja na promenu brzine prostiranja akustičkog talasa kroz transformatorsko ulje pri različitim položajima akustičkih senzora. Na osnovu sprovedenih analiza uočeno je da uticaj promene položaja senzora može da izmeni uticaj promene brzine prostiranja akustičkog talasa na rezultat merenja. Ovo ukazuje da metoda analize osetljivosti merenja "jedna po jedna uticajna veličina" nije dovoljna za analizu osetljivosti algoritma i da je potrebno izvršiti dodatne analize komplementarnim metodama.

Ključne energetske transformator; parcijalno pražnjenje; akustičko merenje; osetljivost merenja;

I. UVOD

Parcijalna pražnjenja se smatraju glavnim uzrokom starenja i nastanka kvarova izolacionih sistema kod energetskih transformatora. Prisutnost parcijalnih pražnjenja u izolaciji je jasan indikator degradacije elektroizolacionog sistema. Upotrebom različitih dijagnostičkih metoda može se odrediti trend degradacije izolacije i dinamika primene preventivnih mera u cilju sprečavanja havarije na energetskom transformatoru. Pri pražnjenju dolazi do konverzije energije i do pojave pratećih efekata parcijalnog pražnjenja kao što su: dielektrični gubitci, promena u gasnom pritisku, hemijska promena u sastavu materijala, zvučna radijacija, optički efekti, termički efekti, elektromagnetska radijacija, pojava impulsa u strujnom kolu i pojava napona. Analiza akustičkih efekata parcijalnog pražnjenja značajna je zbog mogućnosti proračuna tačne lokacije pražnjenja unutar energetskog transformatora koja se može sprovesti u pogonu. U radu je opisana metodologija kojom se vrši proračun lokacije parcijalnog pražnjenja neiterativnim matematičkim algoritmom i prikazane su osnovne jednačine na kojima se metoda bazira. Istaknuti su parametri koji utiču na osetljivost merenja lokacije parcijalnog pražnjenja i izvršena je analiza uticaja promene brzine prostiranja akustičkog signala u transformatorskom ulju na tačnost merenja metodom "jedna po jedna uticajna veličina". Na osnovu rezultata računarskih simulacija uočeno je da uticaj

položaja akustičkih senzora može da izmeni uticaj promene brzine akustičkog signala u transformatorskom ulju na rezultat merenja [1].

II. METODOLOGIJA ODREĐIVANJA LOKACIJE PARCIJALNOG PRAŽNJENJA

Postoje dva principa određivanja mesta nastanka parcijalnog pražnjenja akustičkom metodom: na osnovu amplitudno frekventne promene signala u toku prostiranja putanjom od izvora do senzora i na osnovu merenih vremena kašnjenja signala pri prostiranju od izvora pražnjenja do senzora. Princip određivanja mesta nastanka parcijalnog pražnjenja na osnovu merenih vremena kašnjenja signala dominantno se primenjuje i daje dobre rezultate u praksi [1-3]. Ovaj princip može se primeniti na različite načine, tj upotrebom različitih metoda za proračunavanje mesta pražnjenja od kojih su najrasprostranjeniji : metod apsolutnog vremena, metod vremenske razlike i pseudo-vremenski metod. Navedeni metodi se baziraju na određivanju vremena prostiranja akustičkog signala, na osnovu koga se primenom matematičkih algoritama određuje mesto nastanka parcijalnog pražnjenja u energetskom transformatoru. Mesto nastanka parcijalnog pražnjenja može se odrediti upotrebom kombinovane (elektro/UHF)-akustičke metode ili čisto akustičke metode za detekciju vremena dolaska signala pražnjenja. U radu je korišćena čisto akustička metoda koja se bazira na principu vremenske razlike koji je opisan sistemom nelinearnih jednačina 1-4. Da bi se odredile tačne koordinate parcijalnog pražnjenja x , y , z , potrebno je rešiti sistem nelinearnih jednačina 1-4, što se u konkretnom slučaju realizuje neiterativnim matematičkim algoritmom koji ima niz prednosti u odnosu na standardni iterativni algoritam [1].

$$(x-x_{s1})^2+(y-y_{s1})^2+(z-z_{s1})^2=(v_s \cdot T)^2 \quad (1)$$

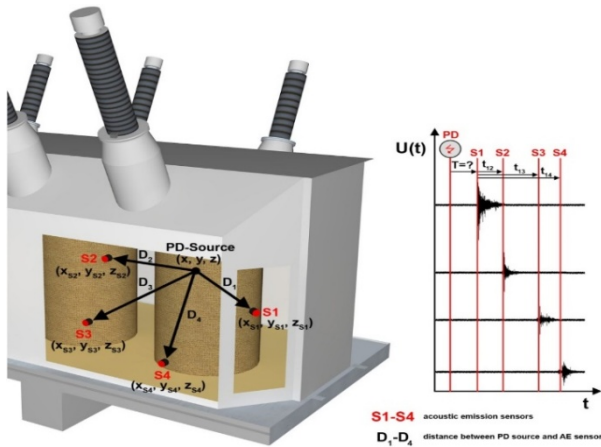
$$(x-x_{s2})^2+(y-y_{s2})^2+(z-z_{s2})^2=(v_s \cdot (T+ \tau_{12}))^2 \quad (2)$$

$$(x-x_{s3})^2+(y-y_{s3})^2+(z-z_{s3})^2=(v_s \cdot (T+ \tau_{13}))^2 \quad (3)$$

$$(x-x_{s4})^2+(y-y_{s4})^2+(z-z_{s4})^2=(v_s \cdot (T+ \tau_{14}))^2 \quad (4)$$

Neiterativni matematički algoritam oslanja se samo na akustička merenja, s obzirom na to nije potrebno obezbediti električna ili druga merenja aktivnosti parcijalnih pražnjenja.

Ovaj metod može se primeniti na terenu na transformatorima u pogonu, upotrebom četiri akustička senzora koji se montiraju na zid transformatora kao što je prikazano na Sl. 1 (levo). Transformator se posmatra u Dekartovom koordinatnom sistemu, svaki senzor poseduje koordinate x_{Si}, y_{Si}, z_{Si} ($i=1,..4$), kao i parcijalno pražnjenje čija je lokacija označena koordinatama x, y, z . Brzina prostiranja akustičkog signala v smatra se konstantnom, zanemaruje se problem prostiranja akustičkog signala kroz druge materijale osim ulja. Na Sl. 1 (desno) prikazan je izgled akustičkih signala parcijalnog pražnjenja snimljenih sa četiri akustička senzora S1, S2, S3, S4 i ilustrovano je vremensko kašnjenje akustičkog signala t_{12}, t_{13}, t_{14} između senzora S1 i S2, S1 i S3, kao i S1 i S4. T predstavlja vreme od nastanka pražnjenja do reagovanja senzora S1 i nije poznato [1].



Slika 1. (levo) Model transformatora sa prikazanim sensorima, izvorom parcijalnog pražnjenja i pravcima prostiranja akustičkog talasa, (desno) vremensko kašnjenje akustičkog signala do senzora S1, S2, S3, S4 [9].
Za potpunije razumevanje realizovanog programskog alata za određivanje lokacije parcijalnog pražnjenja u energetskom transformatoru čitalac se upućuje na [1].

III. OSETLJIVOST MERENJA

Kao što se iz izloženog matematičkog modela vidi određivanje lokacije parcijalnog pražnjenja se vrši posredno. Ulazne veličine koje utiču na tačnost određivanja lokacije parcijalnog pražnjenja su:

- 1) brzina prostiranja akustičkog talasa: v
- 2) koordinata izvora parcijalnog pražnjenja: x, y, z
- 3) koordinata senzora: x_{Si}, y_{Si}, z_{Si} ($i=1,..4$)
- 4) vremenske razlike kašnjenja signala do senzora: t_{12}, t_{13}, t_{14} .

Apsolutne greške u određivanju lokacije parcijalnog pražnjenja ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) su dakle funkcije više promenljivih pa se u generalizovanoj formi ova zavisnost može opisati jednačinom 5.

$$\Delta g = f(x, y, z, x_{S1}, y_{S1}, z_{S1}, v, t_{12}, t_{13}, t_{14}) \quad (5)$$

Osetljivost merenja na pojedine uticajne veličine može se odrediti nalaženjem totalnog diferencijala jednačine 5, odnosno:

$$d(\Delta g) = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_{S1}} dx_{S1} + \dots + \frac{\partial f}{\partial v} dv + \dots + \frac{\partial f}{\partial t_{12}} dt_{12} + \dots \quad (6)$$

U jednačini 6 parcijalni izvodi predstavljaju osetljivosti

merenja na pojedine uticajne veličine, na primer $\frac{\partial f}{\partial v}$ je osetljivost na promenu brzine prostiranja akustičkog talasa. Ovakav način određivanja osetljivosti merenja naziva se metodom "jedna po jedna uticajna veličina". Prednost ovakvog načina merenja osetljivosti jeste jednostavnost, dok je nedostatak nemogućnost otkrivanja interakcija između ulaznih promenljivih.

IV. REZULTATI RAČUNARSKIH SIMULACIJA

Osetljivost merenja na brzinu prostiranja zvučnog talasa je računata u zamišljenom transformatoru oblika kocke dužine stranice $1m$, za položaj parcijalnog pražnjenja $(0.5, 0.8, 0.5)$. Na osnovu rezultata ispitivanja brzine prostiranja akustičkog talasa u transformatorskom ulju u zavisnosti od temperature ulja iz [4] razmatrana je osetljivost merenja na promenu brzine prostiranja zvučnog talasa u granicama od $1000 m/s$ do $1500 m/s$. Promena maksimalne apsolutne greške računata je za koordinate položaja senzora S1(0.2, 1, 0.8), S2(0, 0.2, 0.2), S3(1, 0.6, 0.7), S4(0.3, 0.9, 0) i u odnosu na rezultat dobijen pri brzini $1299.4 m/s$ [2]. Rezultati su prikazani u Tabeli 1.

TABELA I. OSETLJIVOST MERENJA NA PROMENU BRZINE PROSTIRANJA ZVUČNOG TALASA

v [m/s]	Δx [cm]	Δy [cm]	Δz [cm]	$\Delta(\Delta_{max})$ [cm]	$\Delta(\Delta_{max})/v$ [cm/m/s]
1130	1.45	4.83	0.27	4.83	0.0042
1200	0.78	2.61	0.15	2.61	0.0021
1299.4	0	0	0	0	0
1340	0.27	0.97	0.05	0.97	0.0001
1400	0.64	2.17	0.13	2.17	0.0015

Za maksimalnu promenu apsolutne greške dobijena je vrednost $0.0042 cm/m/s$.

U drugom primeru promena maksimalne apsolutne greške računata je za isti položaj parcijalnog pražnjenja i koordinate položaja senzora S1(0.5, 1, 0.5), S2(1, 0.5, 0.5), S3(0.25, 0.25, 0), S4(0.5, 0, 0.5). Rezultati su prikazani u Tabeli 2.

TABELA II. OSETLJIVOST MERENJA NA PROMENU BRZINE PROSTIRANJA ZVUČNOG TALASA

v [m/s]	Δx [cm]	Δy [cm]	Δz [cm]	$\Delta(\Delta_{max})$ [cm]	$\Delta(\Delta_{max})/v$ [cm/m/s]
1130	1.84	4.54	0	4.54	0.004
1200	1.1	2.4	0.3	2.4	0.002
1299.4	0	0	0	0	0
1340	0.1	0.9	1	1	0.0007

v [m/s]	Δx [cm]	Δy [cm]	Δz [cm]	$\Delta(\Delta_{max})$ [cm]	$\Delta(\Delta_{max})/v$ [cm/m/s]
1400	0.22	2.15	1.3	2.15	0.001

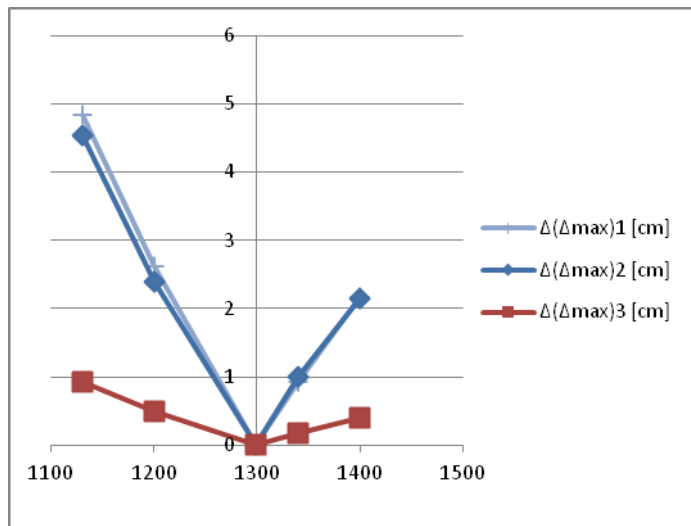
Za maksimalnu promenu apsolutne greške dobijena je vrednost 0.004 cm/m/s. Ovaj rezultat je istog reda veličine kao i rezultat iz prvog primera.

U trećem primeru promena maksimalne apsolutne greške računata je za isti položaj parcijalnog pražnjenja i koordinate položaja senzora S1(0.8, 0.3, 0), S2(0.4, 0.2, 1), S3(0.3, 0.2, 0), S4(0.1, 0.3, 1). Rezultati su prikazani u Tabeli 3.

TABELA III. OSETLJIVOST MERENJA NA PROMENU BRZINE PROSTIRANJA ZVUČNOG TALASA

v [m/s]	Δx [cm]	Δy [cm]	Δz [cm]	$\Delta(\Delta_{max})$ [cm]	$\Delta(\Delta_{max})/v$ [cm/m/s]
1130	0.93	0.21	0.13	0.93	0.0008
1200	0.5	0.12	0.07	0.5	0.0004
1299.4	0	0	0	0	0
1340	0.18	0.04	0.02	0.18	0.0001
1400	0.4	0.1	0.6	0.4	0.0002

Za maksimalnu promenu apsolutne greške dobijena je vrednost 0.0008 cm/m/s. Ovaj rezultat je za red veličine manji od rezultata dobijenih u prva dva primera. Na Sl. 2 uporedo je prikazana promena maksimalne apsolutne greške u zavisnosti od promene brzine prostiranja akustičkog signala v za prva tri primera.



Slika 2. Grafik promene apsolutne greške u zavisnosti od brzine prostiranja akustičkog talasa v [m/s] za isti položaj parcijalnog pražnjenja i tri različita položaja akustičkih senzora

Na osnovu prikazanih rezultata uočava se da je promena položaja senzora u trećem primeru značajno uticala na osetljivost merenja ulazne promenljive v . S obzirom da je maksimalna promena apsolutne greške u trećem položaju manja od 1cm, ovaj položaj akustičkih senzora, za dati položaj

parcijalnog pražnjenja, se može smatrati optimalnim u smislu osetljivosti merenja na ulaznu promenljivu v .

U četvrtom primeru promena maksimalne apsolutne greške računata je za isti položaj parcijalnog pražnjenja i koordinate položaja senzora S1(0.2, 0.5, 0), S2(0.4, 0.5, 0), S3(0.6, 0.5, 0), S4(0.8, 0.5, 0). Algoritam nije uspeo da proračuna koordinate položaja parcijalnog pražnjenja u ovom primeru.

U petom primeru promena maksimalne apsolutne greške računata je za isti položaj parcijalnog pražnjenja i koordinate položaja senzora S1(0.25, 0.2, 0), S2(0.25, 0.4, 0), S3(0.25, 0.65, 0), S4(0.25, 0.8, 0). Algoritam nije uspeo da proračuna koordinate položaja parcijalnog pražnjenja u ovom primeru.

U šestom primeru promena maksimalne apsolutne greške računata je za isti položaj parcijalnog pražnjenja i koordinate položaja senzora S1(0.5, 1, 0.5), S2(0.25, 1, 0.5), S3(0.5, 0, 0.5), S4(0.25, 0, 0.5). Algoritam nije uspeo da proračuna jedinstveno rešenje za položaj parcijalnog pražnjenja.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu realizovani algoritam je ispitivan sa aspekta osetljivosti merenja na promenu brzine prostiranja akustičkog talasa u transformatorskom ulju za tri različita položaja akustičkih senzora. Na osnovu rezultata računarskih simulacija i zaključaka prikazanih u [1] može se izvesti sledeće:

- 1) osetljivost algoritma na promenu brzine prostiranja akustičkog talasa u transformatorskom ulju, nije zanemarljiva, i iznosi 0,004 cm/m/s
- 2) postoji značajna interakcija između brzine prostiranja akustičkog talasa u ulju i položaja akustičkih senzora
- 3) postoje položaji senzora za koje algoritam ne može da odredi lokaciju parcijalnog pražnjenja
- 4) metoda "jedna po jedna uticajna veličina" nije dovoljna za proračun osetljivosti merenja algoritma

Dalja istraživanja biće usmerena na ispitivanja osetljivosti algoritma i otkrivanje interakcija između promenljivih Monte Karlo metodama. Autori očekuju da će rezultati ovih istraživanja dovesti do razvoja softvera, u okviru mernog sistema, koji će u zavisnosti od konstrukcionih parametara transformatora i drugih uticaljnih veličina donositi odluku o optimalnom položaju akustičkih senzora za detekciju parcijalnih pražnjenja.

LITERATURA

- [1] Uroš Kovačević, Vladimir Polužanski, Dragan Kovačević, Nenad Kartalović, Srđan Milosavljević, Analiza osetljivosti merenja pri određivanju lokacije parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru akustičkom metodom, INFOTEH-JAHORINA 2015, Vol 14, ENS 1-4, Jahorina, Bosna i Hercegovina, mart 2015.
- [2] V. Polužanski, U. Kovačević, N. Kartalović, D. Kovačević, Razvoj i verifikacija programskog alata za određivanje lokacije parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru akustičkom metodom, Zbornik radova Instituta Nikola Tesla, Vol. 24, p. 71-85, Beograd, 2014.
- [3] N.K. Kishore, A.K. Sinha, Prasanta Kundu, "A non-iterative partial discharge source location method for transformers employing acoustic emission techniques", *Applied Acoustics* 70, Indian Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Kharagpur, India.

- [4] E. Howells, E. T. Norton, "Parameters affecting the velocity of sound in transformer oil", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.5, May 1984.

ABSTRACT

Goal of this paper is to through analysis of measurement sensitivity increase understanding of the relationships between parameters that are used for determination of partial discharge location using all acoustic method in power transformer. Measurement sensitivity of algorithm for determination of partial discharge location is analyzed on propagation velocity of acoustic wave through transformer oil for different locations of acoustic sensors. Considering simulation results it is noticed

that location of acoustic sensors can change the influence of propagation velocity of acoustic wave on output. This indicates that One-at-a-time method for determining measurement sensitivity is not enough for analysing the algorithm and that is necessary to conduct further testing using complementary methods.

ANALYSIS OF INPUT PARAMETERS INTERACTION IN ALGORITHM FOR DETERMINATION OF PARTIAL DISCHARGE LOCATION USING ALL ACOUSTIC METHOD IN POWER TRANSFORMER

Vladimir Polužanski, Dragan Kovačević, Uroš Kovačević,
Boško Nikolić