

Metoda za ultrazvučno ispitivanje parcijalnih pražnjenja kod mernih transformatora

Nenad Kartalović¹, Nikola Ilić¹, Ana Milošević¹, Dragan Teslić¹, Nikola Cakić¹, Srđan Milosavljević¹,

¹Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu
Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija
nenad.kartalovic@ieent.org

Kratak sadržaj: Zvučna i ultrazvučna praćenja parcijalnih pražnjenja datiraju od najranijih dana praćenja ovih pojava. Savremena merenja i dijagnostika parcijalnih pražnjenja akustičkom (ultrazvučnom i zvučnom) metodom ubrzano se razvija zahvaljujući razvoju i podršci elektronskih komponenti, informatičkih tehnologija odnosno softverskih rešenja kao i razvoju saznanja i dijagnostike parcijalnih pražnjenja. Električna pražnjenja u izolacionom sistemu generišu naponsko-strujne impulse u mreži ali i ultrazvučne talase koji se prostiru kroz izolacioni sistem i konstrukciju. Amplitudno-fazno-frekventna analiza tih signala sadrži u sebi informacije o energiji, tipu i mestu parcijalnih pražnjenja. U radu se razmatra mogućnost povećanja selektivnosti ultrazvučne metode odnosno mogućnost pouzdanije dijagnostike na terenu. Vršena su merenja u laboratoriji i na terenu a kod određenog broja transformatora urađena je analiza gasova rastvorenih u ulju. Dat je komparativni prikaz metoda za detekciju parcijalnih pražnjenja.

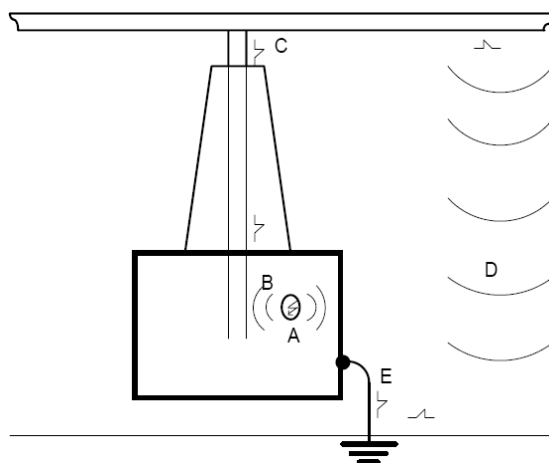
Ključne reči: parcijalna pražnjenja, ultrazvučno merenje, merni transformatori

1. Uvod

Dijagnostika visokonaponskih mašina i opreme zasnovana na merenju parcijalnih pražnjenja posebno se razvija tokom poslednjih decenija. To je podržano razvojem elektronske opreme i IT tehnologija kao i razvoj saznanja o parcijalnim pražnjenjima. Parametri odziva na parcijalna pražnjenja zavise od uslova: električnih, mehaničkih, relativne pozicije pražnjenja, materijala i okruženja. Posledice parcijalnih pražnjenja imaju neke zajedničke karakteristike a dominacija pojedinih efekata je različita u različitim uslovima pražnjenja [1].

Na slici 1. data je situacija događaja parcijalnih pražnjenja u zoni A i osnovni fenomeni koji nastaju tom prilikom [2].

- Elektromagnetno polje – emisija sa mesta pražnjenja i provodnih struktura okruženja (B,D). Detekcija je pomoću (promenljivog) elektromagnetnog (elektičnog/magnetnog) polja antenama, induktivnim petljama ili kapacitivnim sondama.
- Naponski impulsi (C) – impulsi superponirani naponu opterećenja. Detekcija je pomoću sprežnih kondenzatora.
- Strujni impulsi – impulsi superponirani strujama odvoda (E). Detekcija je pomoću mernih impedansi, induktivnih petlji.
- Zvučni/ultrazvučni impulsi (A,B). Detekcija je pomoću ultrazvučnih i zvučnih efekata odnosno sonde sa mesta pražnjenja (A).
- Svetlosni/ultraljubičasti impulsi (A,B). U situacijama kada je to moguće, detektuju se odgovarajućim detektorima.
- Elektrohemijska dekompozicija materijala (A,B) dovodi do pojave gasova u medijima pražnjenja (vodonik, ugljovodonici, ozon itd.) čijom analizom karakterišemo PD.

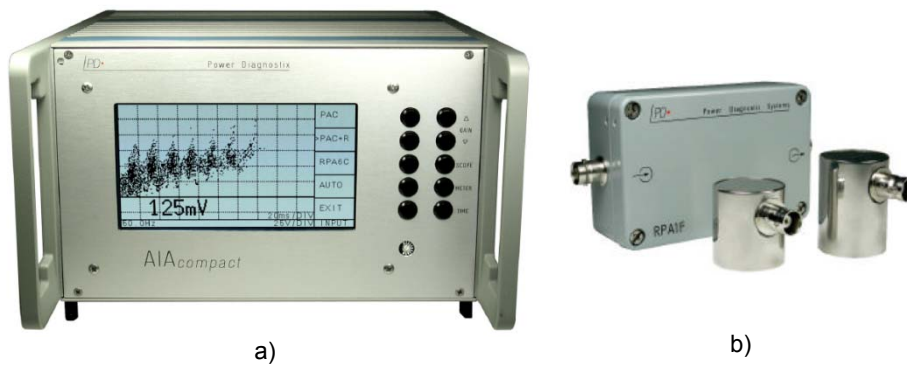


Slika 1. Osnovni fenomeni parcijalnog pražnjenja

U ovom radu se razmatra akustička metoda i njena komplementarnost sa drugim metodama dijagnostike parcijalnih pražnjenja [3]. Jedan od ciljeva rada je povećanje selektivnosti metode odnosno mogućnost pouzdanije dijagnostike na terenu na osnovu mape pražnjenja i drugih podataka koje daje uređaj [4]. Do toga se dolazi analizom signala za konkretne kontrolisane uslove pražnjenja u laboratoriji i dobijenih mapa pražnjenja u dve i tri dimenzije: $\varphi - n - I$ (fazni stav, broj pražnjenja, intenzitet) i upoređenjem sa terenskim podacima.

2. Uređaj AIA

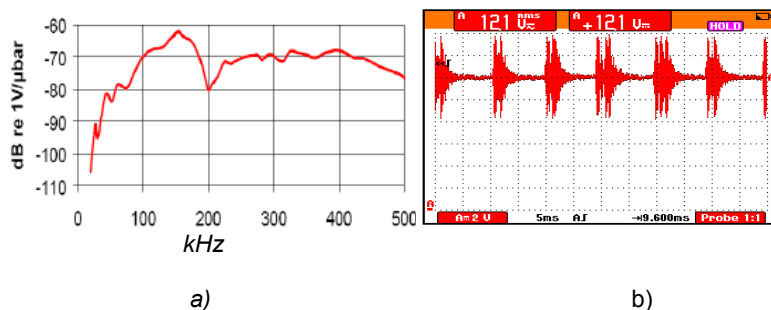
Uređaj **AIA** se koristi za akustička (ultrazvučna) merenja i analizu signala parcijalnih pražnjenja. Uređaj je autonoman, sa sondom, mikroprocesorskim sistemom, memorijom i monitorom, slika 2. Moguća je RS232 komunikacija sa računarnom što znatno proširuje mogućnosti po pitanju memorije, dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih dijagrama merenja, statističke obrade podataka itd [5].



Slika 2. a) AIA uređaj za ultrazvučno merenje parcijalnih pražnjenja, b) sonde AS75-M (rezonantna frekvencija je 75kHz) AS150-M (rezonantna frekvencija je 150kHz), predpojačavač.



Slika 3. Postavljanje ultrazvučnih sondi na merne transformatore.



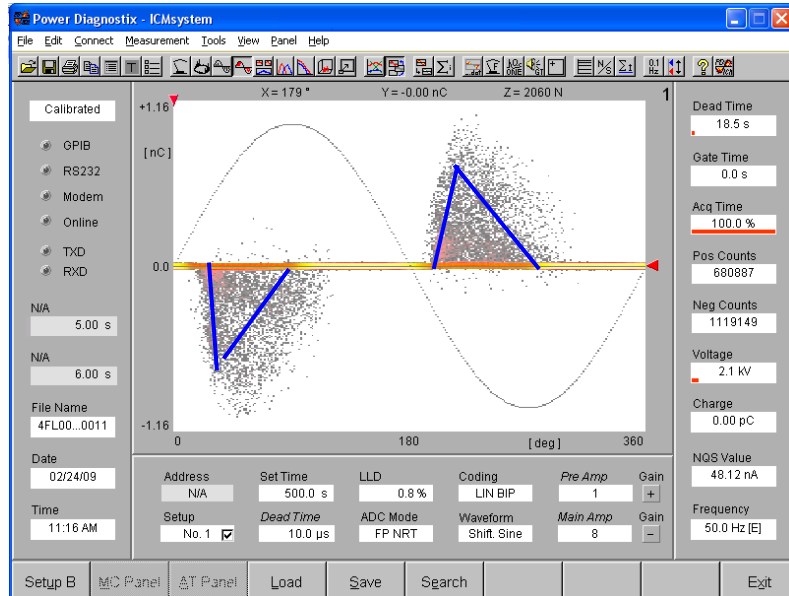
Slika 4. a) prenosna karakteristika sonde AS150-M; b) oscilogram pražnjenja.

Na slici 4 data je prenosna karakteristika sonde AS150-M i oscilogram električnog signala dobijenog sa sonde u slučaju parcijalnih pražnjenja. Tako dobijene električne signale uređaj AIA analizira po faznoj poziciji i magnitudi i dodaje na kumulativnu mapu pražnjenja kao što je na slici 5a). Na osnovu te mape mogu se donositi dijagnostički zaključci. Uređaj AIA pruža i niz drugih mogućnosti analize parametara parcijalnih pražnjenja, kao što su efektivna vrednost magnitude (RMS), maksimalna magnitude (peak). Posebno je zanimljiva analiza prisustva 50Hz i 100Hz frekvencija u spektru koje govore o prisustvu magnetostriksijskih vibracija odnosno stanju jezgra transformatora, slika 5b).

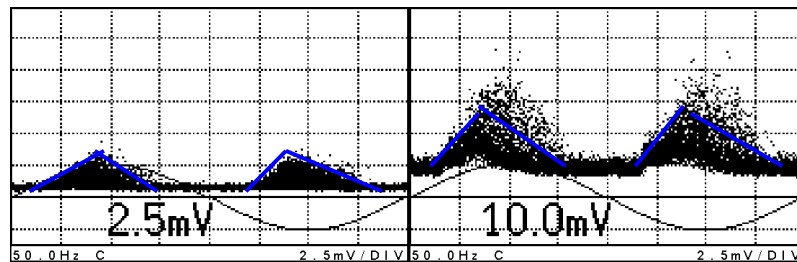
3. Uporedna analiza metoda detekcije pd-a

Radi verifikacije ultrazvučne metode za kvalitativnu i kvantitativnu analizu parcijalnih pražnjenja i povećanja dijagnostičke selektivnosti i pouzdanosti vršena su upoređenja sa drugim metodama. To su električna metoda za merenje parcijalnih pražnjenja (sa kapacitivnom sprežnom jedinicom) i analiza sadržaja gasova u ulju mernih transformatora.

Na slici 5 prikazane su amplitudno-fazne mape parcijalnih pražnjenja u šupljini prečnika 5mm i debljini 0.2mm formiranoj u papirnoj troslojnoj strukturi. Mape su snimljene električnom metodom pomoću uređaja ICMsystem sa kapacitivnom sprežnom jedinicom (slika 5a) i akustičkom metodom pomoću uređaja AIA i sonde VS150 (slika 5b) i VS75 (slika 5c) [4,5]. Saglasno očekivanjima, dobijene su simetrične mape za pozitivnu i negativnu poluperiodu napona. Takođe se može, pažljivijom analizom, uočiti trougaoni oblik mape u sva tri slučaja što govori o velikom slaganju ove dve metode, odnosno o mogućnosti nedvosmislenog dijagnostikovanja unutrašnjih parcijalnih pražnjenja akustičkom metodom.



a)

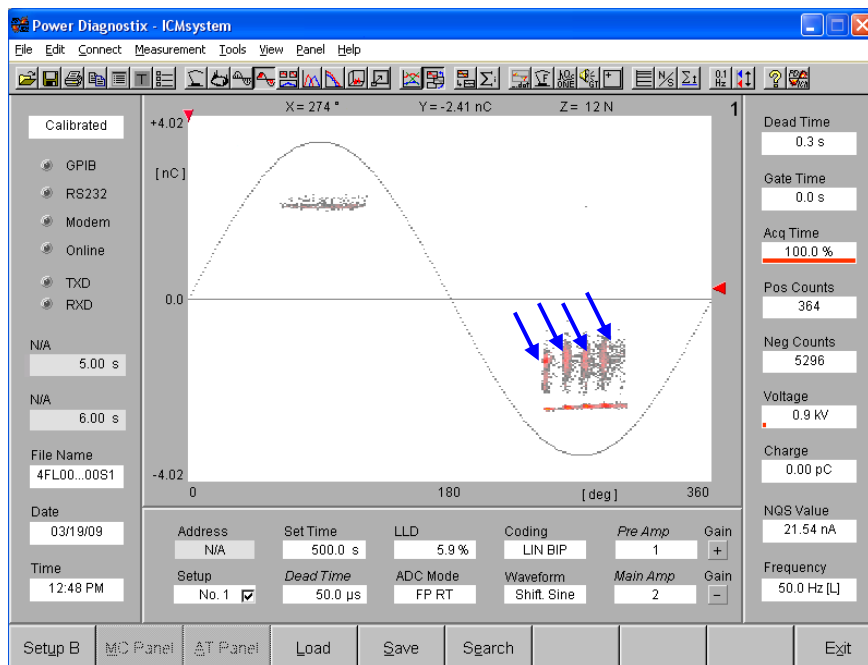


b)

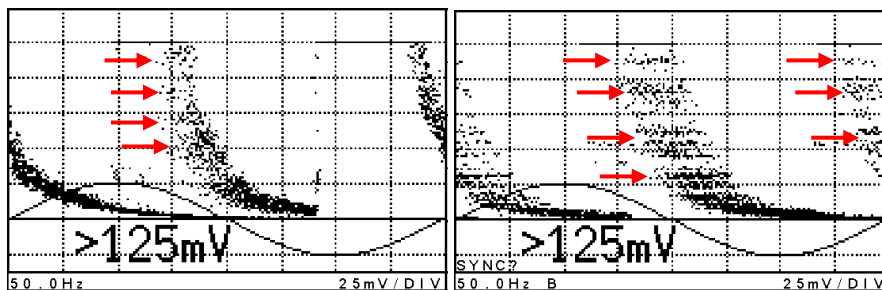
c)

Slika 5. Slučaj simetričnih unutrašnjih parcijalnih pražnjenja a) ICMsystem + sprežna jedinica; b) AIA + VS150; c) AIA + VS75

Na slici 6 imamo mapu parcijalnih pražnjenja u ulju u konfiguraciji šiljak-ravan (ravan uzemljena) snimljene električnom metodom pomoću uređaja ICMsystem sa kapacitivnom sprežnom jedinicom (slika 6a) i akustičkom metodom pomoću uređaja AIA i sonde VS150 (slika 6b) i VS75 (slika 6c). Za električna merenja (slika 6a) vidimo visoku magnitudu pražnjenja kada je šiljak pozitivan (prva poluperioda) i daleko intenzivnija i grupisana pražnjenja kada je negativan (druga poluperioda). Što se tiče AIA merenja možemo primetiti visoke magnitute i visoke intenzitete pražnjenja u obe poluperiode. Pažljivijom analizom možemo uočiti grupisanja pražnjenja na sličan način, uz izvesna odstupanja po faznom stavu, slika 6b i 6c.



a)



b)

c)

Slika 6. Slučaj spoljašnjih parcijalnih pražnjenja u ulju, šiljak-ravan (ravan uzemljena) merenih pomoću: a) ICMsystem + kondenzatorska sprežna jedinica. (Strelicama obeležena grupisanja); b) AIA + VS150, c) AIA + VS75,

4. Analiza eksploatacionih i eksperimentalnih rezultata

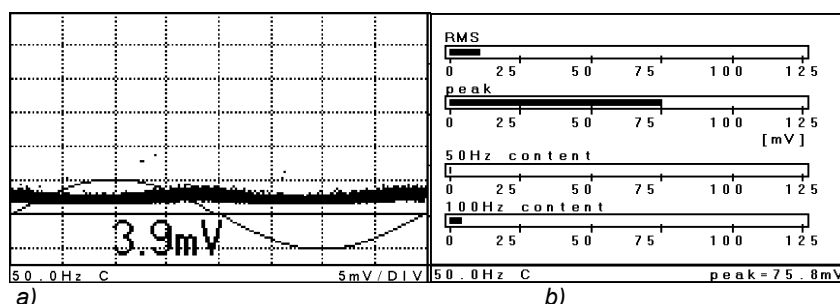
U okviru poslova i istraživanja Institut „Nikola Tesla“ je uradio veliki broj ultrazvučnih merenja parcijalnih pražnjenja na strujnim i naponskim mernim transformatorima na terenu ali i u laboratorijskim uslovima kako na mernim transformatorima tako i na posebnim eksperimentalnim uzorcima. Vršene su i

analize parcijalnih pražnjenja preko sadržaja gasova u transformatorskom ulju [4,5].

Tabela 1. Osnovni podaci o gasnoj analizi ulja i ultrazvučnim ispitivanjima mernih transformatora

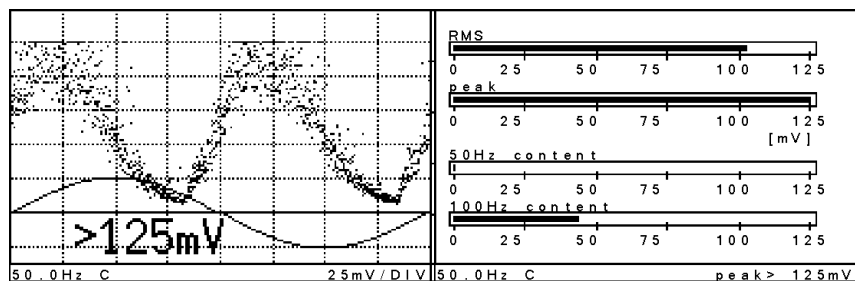
Vrsta transformatora	Fabrički broj	Procena stanja	Sadržaj vodonika	Forma
SMT	xx849 - 81	A - a	11	slika br.4
SMT	xx559 - 85	B - c	9369	slika br.5
SMT	xx7149 - xx	C - c	26842	slika br.6
NMT	xx9640 - 77	A - a	23	slika br.7
NMT	xx2722 - 77	A - a	13	slika br.8
NMT	xx2639 - 77	A - b	33	slika br.9

U tabeli 1. predstavljeni su karakteristični primeri ispitivanih mernih transformatora. Procena stanja prema gasnoj analizi: A(ispravan), B(sumnja na kvar), C(neispravan); prema ultrazvučnoj analizi: a(ispravan), b(sumnja na kvar), c(neispravan). Dat je sadržaj vodonika u ulju u ppm i forma odnosno dijagrami za pojedine transformatore koji su dati na navedenim slikama. Oznaka SMT je strujni merni transformator a NMT je naponski merni transformator.



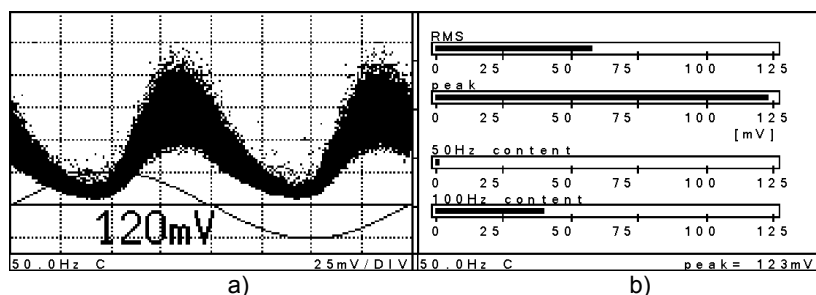
Slika 7. Rezultati analize za transformator xx849-81. a) mapa pražnjenja, b) statistički parametri

Na slici 7 dat je primer ispravnog strujnog mernog transformatora za koji su saglasne obe metode (ultrazvučna metoda i metoda gasne hromatografije). Na slici 8 je predstavljen primer koji je po gasnoj hromatografiji sumnjiv na kvar, tabela 1, a prema ultrazvučnoj analizi on je u odmakloj fazi destrukcije izolacionog sistema. Pražnjenja su još uvek lokalizovana u šupljinama, sudeći prema asimetričnoj trougaonoj formi i faznoj poziciji oko prolaska kroz nulu. To ukazuje na mogućnost da ulje nije kontaminirano gasovima. Preporuka je da se prati stanje transformatora i da se pravilno planiraju aktivnosti održavanja.



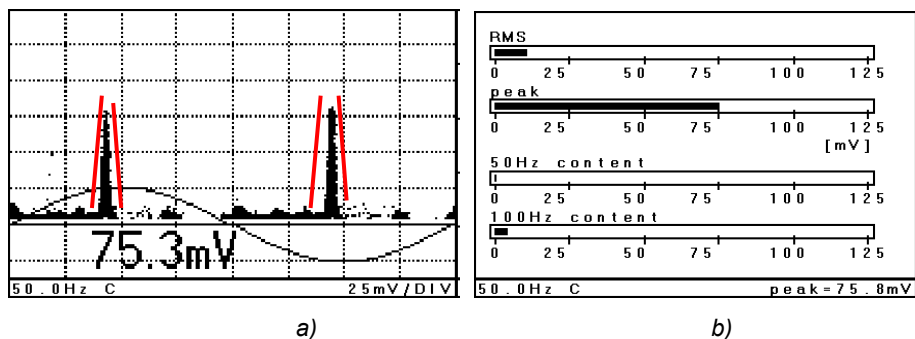
Slika 8. Transformator xx559-85. a) pražnjenja u šupljinama, b) statistički parametri

Na slici 9 prikazan je primer transformatora u neispravnom stanju što pokazuju obe metode, tabela 1. Pražnjenja su u šupljinama (trougaona asimetrična forma, slika 9a) ali i vrlo intenzivna i višestruka tokom jedne periode (što govori širina mape pražnjenja). Utvrđen je visok nivo vodonika u ulju, tabela 1, kao produkta parcijalnih pražnjenja.

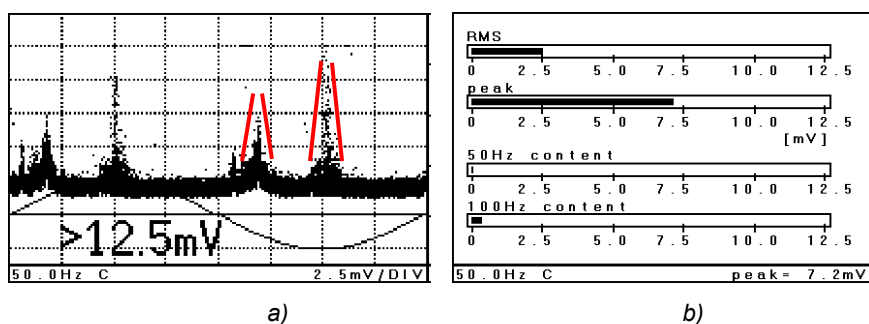


Slika 9. Neispravan transformator 7149-xx. a) pražnjenje u šupljini, b) statistički parametri

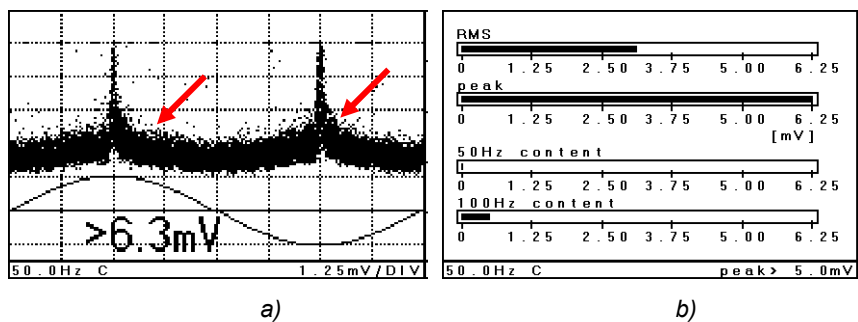
Prilikom rada na terenu poseban problem ima prisustvo pojedinih smetnji koje treba prepoznati i eliminisati. Kako se ispostavilo, posebno su podložni prenosu smetnji naponski merni transformatori. Na slici 10 predstavljen je primer velikog prisustva smetnji u mapi pražnjenja. Osnovni princip prepoznavanja je simetričnost pikova smetnji što ukazuje na gausovu raspodelu [6]. Prema faznoj poziciji može se pretpostaviti da se radi o spoljašnjim pražnjenjima tj o koroni, najverovatnije na priključcima transformatora. Sličnu situaciju imamo predstavljenu na slici 11 gde imamo višestruka spoljašnja pražnjenja koja se opet prepoznaju po simetričnosti raspodele. Rezultate potkrepljuje i gasnohromatska analiza ulja koja je ubedljiva po kriterijumu za odsustvo pražnjenja u ulju, tabela 1.



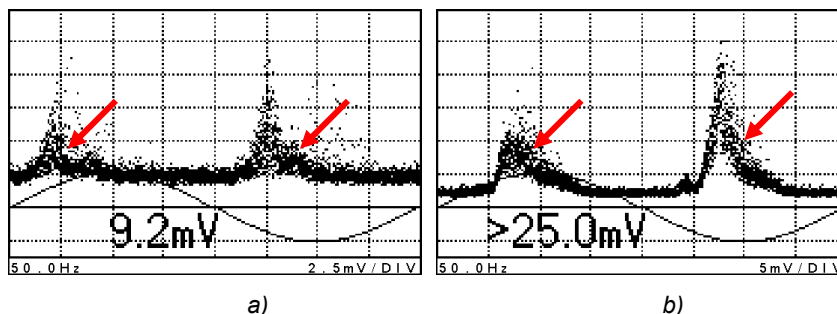
Slika 10. Transformator xx9640 – 77. a) Spoljšnje smetnje. b) statistički parametri



Slika 11. Transformator xx2722 77. a) Spoljašnje smetnje. b) statistički parametri



Slika 12. Sumnjiv na kvar, transformator xx2639 77. a) pražnjenje u šupljini. b) statistički parametri



Slika 13. Referentna pražnjenja, sa asimetričnom raspodelom, nesimetrija raspodele udesno a) u unutrašnjoj šupljini dijametra 1mm i debljine 0.1mm. b) u šupljini dijametra 4mm i debljine 0.2mm pozicioniranoj prema uzemljenoj elektrodi.

Posebno je zanimljiv primer kada ultrazvučno merenje i analiza parcijalnih pražnjenja daje indikaciju sumnje na kvar, a gasna hromatografija daje vrlo niske vrednosti prisustva vodonika, tabela 1 i slika 12. Na slici 12 je data mapa pražnjenja gde se vidi izraziti pik kako po magnitudi energije tako i nagomilavanju događaja pražnjenja različitu od slučaja spoljašnjih smetnji. Imamo izrazitu nesimetriju nagomilavanja prema udesno, naznačena strelicama, slika 12. Kako je transformator indiciran na kvar, izvršena je gasna hromatografija ulja koja je pokazala odsustvo visokih sadržaja vodonika u uzorcima. Na osnovu toga, radi postavljanja jasnije dijagnostike, izvršena su dodatna eksperimentalna istraživanja. U laboratorijskom elektrodnom sistemu formirana je šupljina u troslojnoj papirnoj izolaciji. Tako je šupljina mogla da bude u sredini, odvojena od elektroda i simetrična u odnosu na elektrode ili da se pozicionira pri nekoj elektrodi. Rezultati akustičkih merenja parcijalnih pražnjenja prikazani su na slici 13. Za malu šupljinu, primer mape pražnjenja na slici 13 a) jasno vidimo asimetriju pražnjenja označenu strelicom. Ta asimetrija je vrlo očigledna kod intenzivnijih pražnjenja kada je velika šupljina, slika 13 b). Pored asimetrije mape pika pražnjenja, na slici 13 b) primećujemo asimetriju po poluperiodi, tj jasno se vidi intenzivnije pražnjenje u toku negativne poluperiode. Tada je jedan zid šupljine sama površina elektrode kada je emisija inicijalnih elektrona znatno verovatnija, saglasno teorijskim predviđanjima i praktičnim očekivanjima.

5. Zaključak

Merenje i dijagnostika parcijalnih pražnjenja akustičkom (ultrazvučnom i zvučnom) metodom se pokazala vrlo efikasnom sa više stanovišta. U prvom redu imamo jednostavnost primene u pogonu (na terenu) jer ne zahteva nikakve posebne intervencije. Takođe na terenu vrlo brzo mogu da se ustanove ispravna stanja opreme ili mernih transformatora. U radu je pokazano da je moguće povećati selektivnost dijagnostike pojedinih stanja izolacionog sistema koja ne spadaju u potpunu ispravnost. To u izvesnim slučajevima smanjuje potrebu za dodatnim ispitivanjima.

Literatura

- [1] C. Smith, "Acoustic emission monitoring for high voltage plants", 2004, IPEC Ltd. www.ipec.co.uk
- [2] E. Lemke, et al. "Guide for Partial Discharge measurements in compliance to IEC 60270", *CIGRE, WG D1.33*, ISBN: 978-2-85873-053-7 December 2008.
- [3] N. Kartalović, S. Marinković, D. Teslić, Đ. Jovanović, M. Sušić, „Ultrazvučno ispitivanje parcijalnih pražnjenja kod mernih transformatora“, R A2-07 / *SAVJETOVANJE CG KO CIGRE*, Hotel Maestral, Pržno, 12. - 16.10.2009.
- [4] N. Kartalović, Lj. Nikolić, Đ. Jovanović, J. Lukić, S. Marinković, D. Teslić, „Upoređivanje metoda za merenje parcijalnih pražnjenja“, R A3-01 / *SAVJETOVANJE CG KO CIGRE*, Hotel Maestral, Pržno, 12. - 16.10.2009.
- [5] G. W. Detlev, "Partial Discharge Diagnosis of Motor Defects", *Nordic Insulation Symposium Tampere*, June 11-13, 2003
- [6] N. Kartalović, „Stohastičnost dielektrične čvrstoće gasne izolacije“, *disertacija, ETF Beograd*, 2000.

Abstract: Sonic and ultrasonic partial discharge monitoring have been applied since the early days of these phenomena monitoring. Modern measurement and partial discharge acoustic (ultrasonic and sonic) monitoring method has been rapidly evolving as a result of new electronic component design, information technology and updated software solutions as well as the development of knowledge in the partial discharge diagnosis. Electrical discharges in the insulation system generate voltage-current pulses in the network and ultrasonic waves that propagate through the insulation system and structure. Amplitude-phase-frequency analysis of these signals reveals information about the intensity, type and location of partial discharges. The paper discusses the possibility of ultrasonic method selectivity improvement and the increase of diagnosis reliability in the field. Measurements were performed in the laboratory and in the field while a number of transformers were analysed for dissolved gases in the oil. A comparative review of methods for the partial discharge detection is also presented in this paper.

Key words: partial discharges, ultrasonic measurement, instrument transformers

Ultrasonic Partial Discharge Monitoring Method On Instrument Transformers