

Merenje parcijalnih pražnjenja UHF metodom

Nevena Malešević¹, Mileta Žarković², Denis Ilić¹, Đorđe Jovanović¹

¹Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

nevena.malesevic@ieent.org

²Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73,
11000 Beograd, Srbija

mileta@etf.rs

Kratak sadržaj: Nekonvencionalna UHF (*Ultra High Frequency*) metoda merenja parcijalnih pražnjenja (PP) je bazirana na merenju elektromagnetnih talasa (EM) u UHF frekventijskom opsegu (300-3000) MHz, pomoću odgovarajućih antena. Ova metoda je nekonvencionalna, ali je široko prihvaćena zbog mogućnosti primene u postrojenjima u *on-line* režimu i brzom pregledu (*screeningu*) postrojenja. Takođe, ovu metodu odlikuje visok stepen merne osetljivosti i relativno dobre otpornosti na smetnje. Kako su impulsi PP veoma kratkog trajanja, reda nanosekundi, generišu elektromagnetni impuls čiji spektar dostiže GHz. U provodnim strukturama objekta ovi impulsi indukuju elektromagnetne talasne tranzijente. Određeni tip antena ima mogućnost prijema tih talasa. U radu je dat primer terenskih i laboratorijskih ispitivanja koja pokazuju korelaciju između detekcije PP pomoću UHF uređaja i uređaja na principu akustičke detekcije. Dokazana je mogućnost pouzdane detekcije parcijalnih pražnjenja u postrojenjima u pogonu.

Ključne reči: parcijalna pražnjenja, UHF ispitivanja, nekonvencionalne metode, akustična ispitivanja, razvodna postrojenja, merni transformatori

1. Uvod

Ispitivanje parcijalnih pražnjenja (PP) UHF metodom pripada nekonvencionalnim metodama merenja PP koja ima za cilj da utvrdi stanje izolacionog sistema elektroenergetske opreme. Pored detekcije PP, ova metoda ima sposobnost pronalazačenja lokacije njihovih izvora. Takođe UHF

metodom se izbegavaju šumovi koji se javljaju u spektru do 100 MHz, zahvaljujući širokom frekventnom opsegu rada UHF senzora [1,2].

Detekcija i analiza aktivnosti PP pomoću detekcije elektromagnetnih emisija se odavno koristi. U novije vreme je izrazito proširen frekvencijski opseg signala PP koji se analizira i unapređeni su algoritmi njihove analize. Uobičajeno se UHF signal prostire kao transverzalni elektromagnetski talas (TEM). TEM talas sadrži komponente u ravni koja je normalna (transverzalna) na pravac prostiranja talasa. Međutim, usled komponenti energije signala u UHF području, pobuđuju se i viši transverzalni električni (TE) i transverzalni magnetni (TM) talasi. TE talas je talas za koji važi da ne postoji komponenta električnog polja u pravcu prostiranja talasa, ali postoji tangencijalna komponenta magnetnog polja. TM talas je talas za koga važi da ne postoji komponenta magnetnog polja u pravcu prostiranja talasa, ali postoji tangencijalna komponenta električnog polja. Talas će prilikom prostiranja sadržati više modove ukoliko se u spektru energije pojavljuju visokofrekventne komponente koje su veće od graničnih frekvencija ispod kojih viši modovi ne mogu da se pobude [3].

U odnosu na frekvencijski opseg EM talasa u tabeli 1 prikazane su oznake opsega sa naznačenom širinom.

Tabela 1 Oznaka opsega u odnosu na frekvencije EM talasa [1]

Granične frekvencije	Talasne dužine	Naziv talasnog područja	Oznaka opsega
3-30 kHz	100-10 km	Mirijametarski – vrlo dugi talasi	<i>VLF (Very Low Frequencies)</i>
30-300 kHz	10-1 km	Kilometarski – dugi talasi	<i>LF (Low Frequencies)</i>
300-3000 kHz	1000-100 m	Hektometarski – srednji talasi	<i>MF (Middle Frequencies)</i>
3-30 MHz	100-10 m	Dekametarski – kratki talasi	<i>HF (High Frequencies)</i>
30-300 MHz	10-1 m	Metarski – ultra kratki talasi	<i>VHF (Very High Frequencies)</i>
300-3000 MHz	1-0.1 m	Decimetarski	<i>UHF (Ultra High Frequencies)</i>
3-30 GHz	10-1 cm	Centimetarski	<i>SHF (Super High Frequencies)</i>
30-300 GHz	10-1 mm	Milimetarski	<i>EHF (Extra High Frequencies)</i>
300-3000 GHz	1-0.1 mm	Decimilimetarski	<i>THF (Tremendously High Frequencies)</i>

Ako se pođe od tipičnog frekvencijskog sadržaja signala PP može se uočiti da su u frekvencijskom opsegu do 300 MHz, vrednosti kritičnih frekvencija viših modova obično veće u odnosu na značajan deo frekvencijskog sadržaja koji dominantno prenosi energiju EM talasa. Zbog toga je nivo TEM talasa veoma važan za detekciju UHF signala usled aktivnosti PP i za osetljivost UHF antena. U ranim fazama prostiranja signala, svako pobuđivanje TEM moda podrazumeva i pobuđivanje viših modova, koje

proizvode polje koje je različito od nule samo u oblasti veoma blizu samom izvoru i viši modovi se pojavljuju sa značajnim doprinosima. Oblik polja, broj i prisustvo viših modova dosta zavisi od širine impulsa PP. U slučaju da strujni impulsi postaju sve uži, što odgovara strmijim promenama struje, povećava se prostorno odstupanje polja duž poprečnog preseka provodnih struktura i viši modovi postaju sve dominantniji u odnosu na TEM mod. Ako je širina impulsa PP relativno velika i odgovara sporim promenama struje u odnosu na vreme potrebno da se polje prostire i pređe put duž poprečnog preseka provodnih struktura, uticaj viših modova slabi i TEM mod je dominantan. Ako su izvori PP locirani u blizini oklopa, pobuđuju veći broj viših modova kao posledica veće prostorne varijacije polja.

Signali PP (EM talasi) pri svom prostiranju mogu imati veoma složene putanje koje obuhvataju veliki broj diskontinuiteta. Laboratorijska ispitivanja na specifičnim uzorcima omogućila su da se odrede osnovni fizički fenomeni koji dovode do slabljenja signala. Osnovna veličina od interesa koja se prati je snaga UHF signala P_{UHF} (dBm), jer je dobar pokazatelj praga detekcije signala. Ta snaga je reda oko 1 μ W što je oko -30 dBm i navedena je kao referentna veličina. U slučaju struktura sa velikim brojem tačaka diskontinuiteta, prosečno slabljenje može se proceniti na oko 1-2 dB/m [1].

2. Primena UHF metode

2.1 Terenska ispitivanja u VN postrojenju

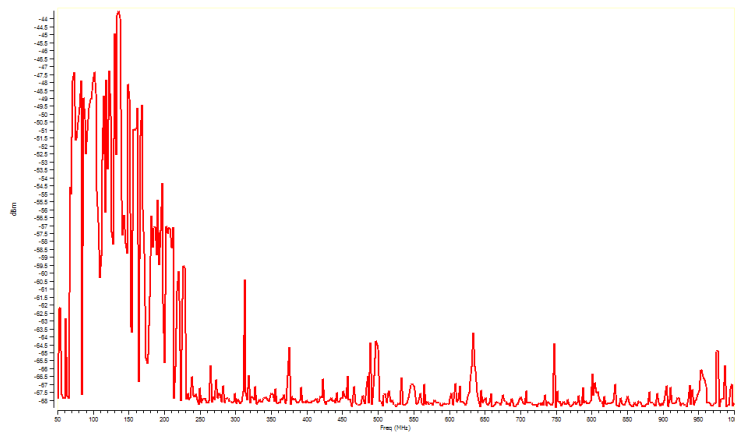
Do sada nije otkriveno univerzalno rešenje za sva merenja i dijagnostiku parcijalnih pražnjenja. Radi poboljšanja pouzdanosti elektroenergetskog sistema, stvorila se potreba za metodom i odgovarajućim mernim uređajima kojima će se moći, u kratkom vremenskom roku i bez prekida rada postrojenja, izvršiti pregled većeg broja različitih elektroenergetskih (EE) objekata. Cilj korišćenja ovakvih uređaja je pravovremeno pronalaženje sumnjivog mesta koja bi se dalje detaljnije istražila što povoljno utiče i na tehnički i na ekonomski aspekt eksploatacije postrojenja [4].

Na terenu su ispitivani naponski merni transformatori (NMT) na mestu pogona u 110 kV postrojenju. Ispitivanja PP su vršena UHF i akustičnom metodom, na istim objektima ispitivanja, u cilju paralelne analize i pronalaženja korelacije između ove dve metode.

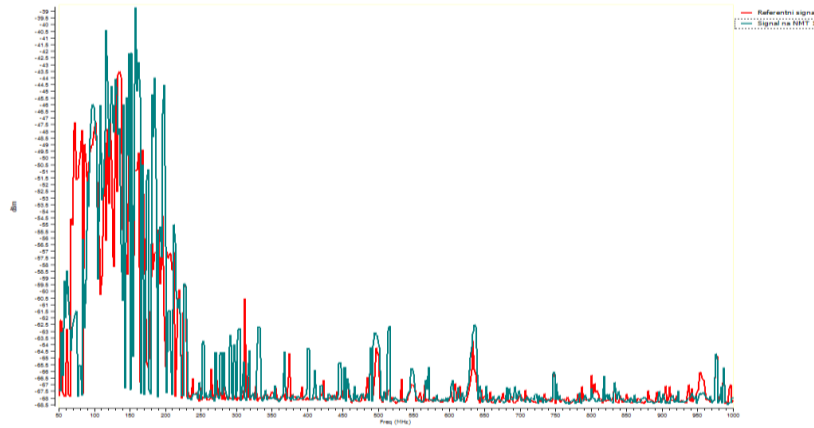
Metodologija ispitivanja PP na EE objektima u visokonaponskim postrojenjima primenom UHF metode je zasnovana na principu poređenja frekventnog spektra UHF signala u okruženju i neposredno pored objekta. Zbog toga je potrebno izvršiti referentno merenje radi dobijanja referentnog baznog grafika UHF aktivnosti. Akvizicija se vrši izvan postrojenja kako bi se

dobili signali u pozadini koji su uzrokovani različitim izvorima UHF zračenja (FM radio, TV stanice, bazne stanice mobilne telefonije i dr.). To je bazna UHF karakteristika (grafik) u odnosu na koga će se porediti karakteristike ostalih signala (grafika) snimljenih u blizini ispitivanog EE objekta. Zato je potrebno da se bazni grafik snimi što dalje od elemenata pod naponom koji bi uticali na dati signal i tako stvorili poteškoće pri analizi dobijenih rezultata.

Na slici 1 prikazan je bazni grafik u odnosu na koji se porede ostali grafici dobijeni prilikom ispitivanja opreme. Nivo signala na baznom grafiku, koji se javlja oko frekvencije 100 MHz, može biti posledica FM radio talasa koji se kreću u opsegu (88–108) MHz. Zatim je UHF uređajem (sa neusmerenom antenom) izvršeno više merenje u okolini naponskih mernih transformatora (NMT). Pri tome, značajna odstupanja karakteristika merenog signala u odnosu na referentni, potencijalno mogu ukazati na mogućnost prisustvo parcijalnih pražnjenja. Na slici 2 je prikazan rezultat jednog takvog snimanja. Na istoj slici predstavljen je pozadinski (referentni) signal (crvena boja) i signal u okolini NMT No 1 (zeleno boja). Kako dobijeni signal nema većih odstupanja u odnosu na referentni, otklanja se sumnja na mogućnost aktivnosti parcijalnih pražnjenja na ovom transformatoru.



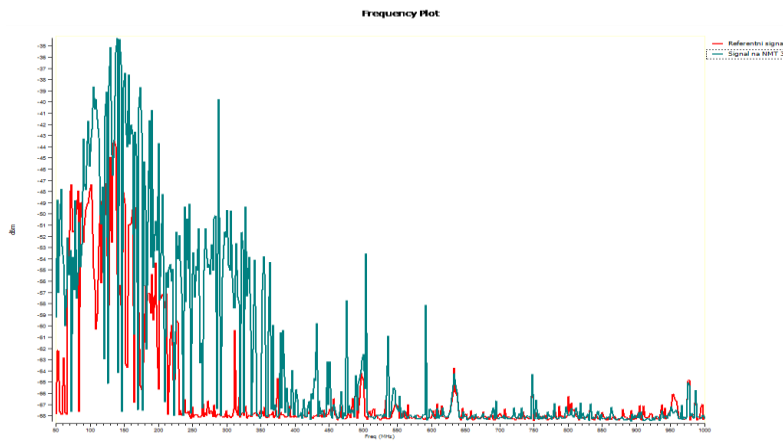
Slika 1. Referentni signal UHF merenja PP – okruženje. Frekvencijski opseg (50-1000) MHz, opseg magnitude (-70;-44) dBm [1]



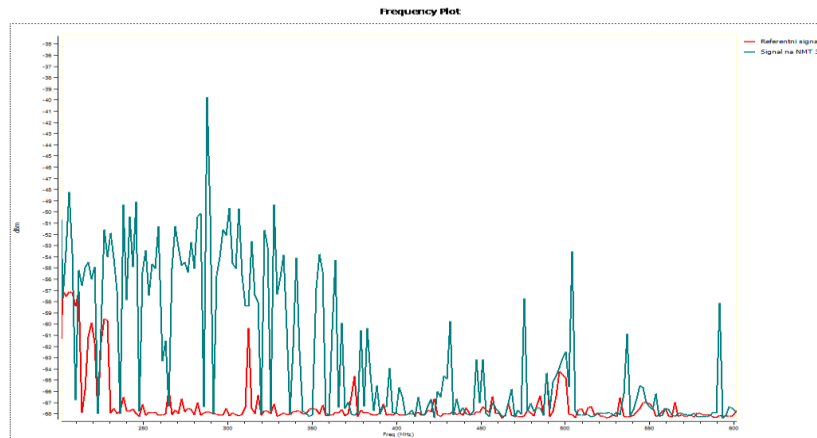
Slika 2. Referentni (crveni) i ukupni (zeleni) signali UHF merenja PP za NMT No 1. Frekvencijski opseg (50-1000) MHz, opseg magnitude (-70;-44) dBm [1]

Međutim, na slici 3, koja predstavlja signale zabeležene u neposrednoj blizini NMT No 3 može se uočiti veliko odstupanje između signala. Magnituda ukupnog signala za frekvencijski opseg (200-600) MHz, izdvojena na slici 4, ukazuje na mogućnost prisustva parcijalnih pražnjenja.

To govori o mogućnosti da na ovom transformatoru postoji potencijalno sumnjivo mesto i preporučljivo je pristupiti detaljnijim ispitivanjima radi utvrđivanja sumnji na dejstvo parcijalnih pražnjenja na ovom transformatoru.

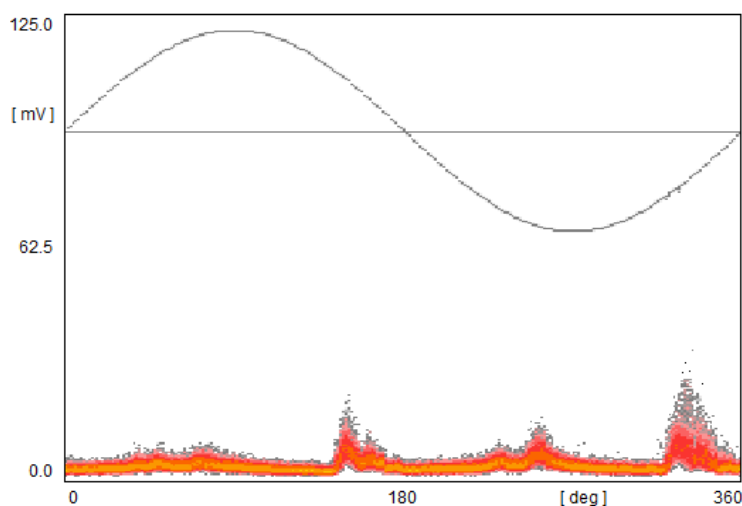


Slika 3. Referentni (crveni) i ukupni (zeleni) signali UHF merenja PP za NMT No 3. Frekvencijski opseg (50-1000) MHz, opseg magnitude (-70;-30) dBm [1]



Slika 4. Referentni (crveni) i ukupni (zeleni) signali UHF merenja PP za NMT No 3. Frekvencijski opseg (200-600)MHz, opseg magnitude (-70;-30) dBm [1]

Prema proceduri u praksi, naredni korak bi bilo uzimanje uzorka ulja i njegova gasnohromatografska analiza kojom bi se potvrdile ili opovrgle date sumnje na dejstvo parcijalnih pražnjenja na ovom transformatoru. U ovom slučaju izvršena su akustička ispitivanja NMT No 3, slika 5. Veličina i forma pikova na mapi fazne raspodele impulsa PP ukazuju na postojanje parcijalnih pražnjenja tipa unutrašnja šupljina u izolaciji (bez elektrodnih efekata) [5]. Poređenjem rezultata sa slike 4 i slike 5 može se doći do zaključka da uporedna ispitivanja PP sa više metoda mogu da daju relativno pouzdanu potvrdu prisustva PP.



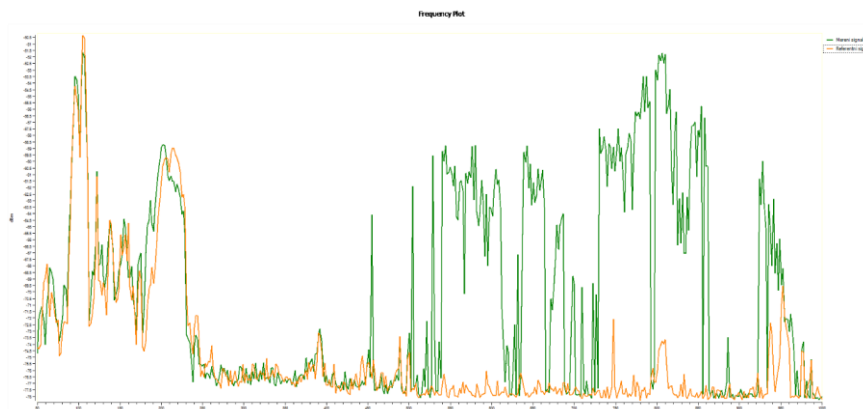
Slika 5. Akustička ispitivanja PP za NMT No 3 [1]

2.2 Laboratorijska ispitivanja

U visokonaponskoj laboratoriji formirana je elektrodna konfiguracija šiljak - uzemljeno okruženje. Izvršeno je snimanje spektra referentnog signala, slika 6, narandžasta linija i ukupnog signala, zelena linija. Na baznoj (narandžastoj) liniji, prema očekivanjima, uočeni su pikovi FM talasa (oko 100 MHz) i operatera mobilne telefonije (oko 800 MHz). Za opseg frekvencija (450-900) MHz nivo ukupnog signala je znatno veći u odnosu na bazni. Time je pokazan uticaj i karakteristike pražnjenja šiljka prema uzemljenim delovima.

Može se uočiti da je frekventijski opseg za PP u MNT u opsegu (200-600) MHz za, najverovatnije, pražnjenja u šupljinama izolacije bez elektrodnog efekta, slika 4. Za konfiguraciju šiljak - uzemljeno okruženje opseg frekvencija je (450-900) MHz. Ovo daje mogućnost da se tipovi pražnjenja mogu razlikovati po frekventijskom opsegu.

Dalja laboratorijska i terenska istraživanja bi mogla da daju odgovor koji amplitudno-frekventijski dijagrami odgovaraju kojem tipu pražnjenja. Pri tome treba voditi računa o „talasovodima“, odnosno o provodnim strukturama ispitivanih objekata kao i uticaju okruženja.



Slika 6. Referentni (narandžasti) i ukupni (zeleni) signali UHF merenja PP u VN laboratoriji za konfiguraciju šiljak – uzemljeno okruženje. Frekventijski opseg (200-600) MHz, opseg magnitude (-80;-50) dBm [1]

3. Diskusija

Parcijalna pražnjenja predstavljaju delimične proboje, što je glavna razlika u odnosu na potpuni proboj izolacije. PP se javljaju na mestima gde je jačina električnog polja premašila kritičnu vrednost za jonizaciju medijuma (E_{kr}). Ta

mesta najčešće nastaju tokom starenja izolacionog sistema. U određenim slučajevima parcijalna pražnjenja mogu da oštećuju izolaciju i zato spadaju u red negativnih pojava. Zbog toga je detekcija i lociranje dejstva parcijalnih pražnjenja u elementima elektroenergetskog sistema veoma značajna. Značaj se ogleda u detekciji kvara u njegovoj ranoj fazi, ali i sprečavanju havarije koja bi mogla da obustavi rad postrojenja i sa sobom donese ogromne negativne posledice. Otkrivanje kvara u začetku doprinosi povećanju pouzdanosti elektroenergetskog sistema, jer je pravovremenom reakcijom moguće planirati različite korektivne mere. Zbog toga je važno omogućiti brz pregled velikog broja aparata u postrojenju bez obustave rada elemenata, odnosno u *on-line* režimu i time locirati potencijalna sumnjiva mesta.

U radu je predstavljena detekcija parcijalnih pražnjenja UHF metodom, koja se bazira na merenju elektromagnetnog signala u UHF frekventnom opsegu koji je posledica aktivnosti PP. Ova metoda slično akustičkoj metodi poseduje prednost da se vrši u *on-line* režimu, bez potrebe za isključenjem ispitivanog EE objekta. UHF metoda ispunjava zahteve da se za kratko vreme obavi pregled-skeniranje većeg broja EE objekata u visokonaponskom postrojenju i relativno pouzdano locira potencijalno defektni objekti. Detektovanjem potencijalnog kvara, ona na brz način daje sliku o ispitivanom elementu i ukazuje za koje elemente treba pristupiti detaljnijim ispitivanjima, jer je primena više metoda radi dobijanja kompletne slike o stanju ispitivanog objekta veoma značajna. Takođe, vršena su ispitivanja i akustičnom metodom u cilju potvrde rezultata dobijenih UHF merenjem i nalaženja fenomenološke veze ove dve metode.

4. Literatura

- [1] N. Malešević, „Detekcija parcijalnih pražnjenja“, Master rad, Elektrotehnički fakultet, mentor M. Žarković, Beograd, 2020.
- [2] CIGRE 444, WG D1.33 Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements, <http://www.e-cigre.org/publication/444-guidelines-for-unconventional-partial-discharge-measurements>
- [3] S. Stefanovski, B. Kolundžija, “The impedance variation with feed position of a microstip line-fed patch antenna”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 85-96, February 2014, ISSN: 2217-7183.
- [4] Doble Engineering Company, DFA300 Dielectric Fault Analyzer, User Guide, 2016.
- [5] N. Kartalović, N. Ilić, A. Milošević, D. Teslić, N. Cakić, S. Milosavljević, „Metoda za ultrazvučno ispitivanje parcijalnih pražnjenja kod memih transformatora“, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“*, knjiga 22. 2012, [doi: 10.5937/zeint22-2848](https://doi.org/10.5937/zeint22-2848)

Abstract: The unconventional UHF (Ultra High Frequency) method of measuring partial discharges (PD) is based on measuring electromagnetic waves (EM) in the UHF frequency band (300-3000) MHz, using appropriate antennas. This method is unconventional, but is widely accepted due to the possibility of application in plants in the online mode and quick review (screening) of the plant. Also, this method is characterized by a high degree of measurement sensitivity and relatively good resistance to interference. As the PD pulses are of very short duration, of the order of nanoseconds, they generate an electromagnetic pulse whose spectrum reaches GHz. In the conductive structures of an object, these pulses induce electromagnetic wave transients. A certain type of antenna has the ability to receive these transient waves. The paper gives an example of field and laboratory tests that show the correlation between the detection of PD using UHF devices and devices based on the principle of acoustic detection. The possibility of reliable detection of partial discharges in plants in operation has been proven.

Keywords: partial discharges, UHF test, unconventional method, acoustic test, switchgear, instrumental transformer.

Partial Discharges Measurement by UHF Method

Nevena Malešević, Mileta Žarković, Denis Ilić, Đorđe Jovanović

Rad primljen u uredništvo: 02.10.2020. godine.

Rad prihvaćen: 08.10.2020. godine.