

DOI: [10.46793/CIGRE37.B1.08](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B1.08)**B1.08****IMPLEMENTACIJA SISTEMA ZA ONLINE MONITORING PARCIJALNIH
PRAŽENJENJA NA 110 KV KABLU TS OBRENOVAC – TS TENT A****IMPLEMENTATION OF AN ONLINE PARTIAL DISCHARGE MONITORING SYSTEM
ON THE 110 KV CABLE LINE SS OBRENOVAC – SS TENT A SP****Miloš Markotanović*, Branko Đorđević, Mirko Borović, Aleksandra Višnjić**

Kratak sadržaj: Procena stanja izolacije visokonaponskih elektroenergetskih mreža neinvazivnom metodom online monitoringa parcijalnih pražnjenja (PP) trenutno je uobičajena praksa u programima održavanja elemenata distributivne i prenosne mreže. Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd (EMS AD) upravlja velikim brojem elektroenergetske (EES) opreme, na kojima se mogu primeniti različite strategije monitoringa parcijalnih pražnjenja za kontrolu stanja izolacije. Jedan od ciljeva EMS AD je implementacija sistema za monitoring u realnom vremenu sa ciljem optimizacije procesa održavanja i sprovođenja dijagnostike za rano otkrivanje izolacionih defekata i predviđanje kvarova na kablovskim vodovima. U radu je dat opis aktivnosti na implementaciji online monitoring sistema za detekciju parcijalnih pražnjenja koja obuhvata instalaciju stalnih senzora visoke frekvencije na strateške pozicije kako bi se dijagnostifikovalo stanje izolacije kablovskog voda. Takođe, predstavljeni su različiti nivoi dijagnostike primenom softverskog alata za automatsko odbacivanje parcijalnih pražnjenja koja ne potiču od defekata u izolaciji, kao i alat za lokalizaciju parcijalnih pražnjenja po dužini kablovskog voda.

Ključne reči: *online, parcijalna pražnjenja, kablovski vod*

Abstract: The assessment of the insulation condition of high-voltage power transmission networks using a non-invasive method of online partial discharge (PD) monitoring is currently a common practice in maintenance programs for elements of the distribution and transmission networks. The joint-stock company "Elektromreža Srbije" Belgrade (EMS AD) manages a large number of power equipment (EES), on which various partial discharge monitoring strategies can be applied to control the insulation condition. One of the goals of EMS AD is to implement a real-time monitoring system aimed at optimizing the maintenance process and conducting diagnostics for the early detection of insulation defects and predicting failures in cable lines. The paper describes the activities related to the implementation of an online monitoring system

* Miloš Markotanović, FIMEL Company, milos.markotanovic@fimel.rs

Aleksandra Višnjić, EMS AD, aleksandra.visnjic@ems.rs

Branko Đorđević, EMS AD, branko.djordjevic@ems.rs

Mirko Borović, EMS AD, mirko.borovic@ems.rs

for partial discharge detection, which involves the installation of permanent high-frequency sensors at strategic locations to diagnose the insulation condition of cable lines.

Additionally, different levels of diagnostics are presented through the use of a software tool for automatically

eliminating partial discharges that do not originate from insulation defects, as well as a tool for localizing partial discharges along the length of the cable line.

Keywords: *online, partial discharges, cable*

1 UVOD

Najveći izazov u širokoj primeni ispitivanja parcijalnih pražnjenja (PP) u distributivnim i prenosnim mrežama jeste sam trošak opreme za merenje i dijagnostika defekata izolacije.

U radu je predstavljen novi sistem za online praćenje PP, koji koristi niskobudžetne senzore za prikupljanje signala PP. Ovi senzori odlikuju se visokim tehničkim performansama, uključujući visoku osetljivost, ravnomerni frekvencijski odziv, visok imunitet na šumove, samokalibracioni kalem i izuzetnu dielektričnu čvrstoću. Sistem omogućava masovnu instalaciju na strateškim tačkama kablovskog voda.

Takođe, prikazan je inteligentni softver koji je sposoban da automatski vrši separaciju različitih izvora PP i prepozna stanje izolacije kablovskog voda, kao i da omogući tehničkom osoblju da vrši periodičnu inspekciju stanja izolacije opreme, bez specifične obučenosti u vezi sa PP. Utvrđivanje grubog stanja izolacije se može vršiti sa osnovnim znanjem o PP. Samo sumnjivi slučajevi, koji predstavljaju vrlo mali procenat, moraju biti analizirani od strane stručnjaka specijalizovanih za PP merenja. [1] [2] [3] [4]

2 OSNOVNI KONCEPTI I ZAHTEVI ZA ONLINE PRAĆENJE PARCIJALNIH PRAŽNJENJA NA KABLOVSKIM VODOVIMA

Poznato je da je ispitivanje parcijalnih pražnjenja, u ovom trenutku, najpouzdaniji alat za procenu stanja izolacije kablovskih vodova.

Ispitivanje PP može biti vrlo koristan alat za prevenciju kvarova pre nego što se dogode, što je jedan od ciljeva održavanja, ali sa druge strane, merenje PP nije uvek jednostavno ili čak moguće, u zavisnosti od vrste elektroenergetske opreme. Česta ispitivanja predstavljaju značajan izdatak, a sistemi za merenje (i njihova instalacija) podrazumevaju značajnu investiciju za preduzeće, pa se studija slučaja isplativosti mora uraditi, uzimajući u obzir moguću korist od svakog troška. Pored toga, iako merenje PP može ponuditi veoma vredne informacije o stanju izolacije, upravljanje i analiza podataka koji dolaze sa uređaja za merenje nisu jednostavni. Potrebno je filtrirati signale i pravilno interpretirati PP parametre da bi se identifikovalo da li se pražnjenja javljaju u samom elektroenergetskom objektu i, ako postoji, da li odgovara koroni, spoljnim površinskim pražnjenjima ili unutrašnjim šupljinskim pražnjenjima, koje ukazuje na defekt u izolaciji. [5]

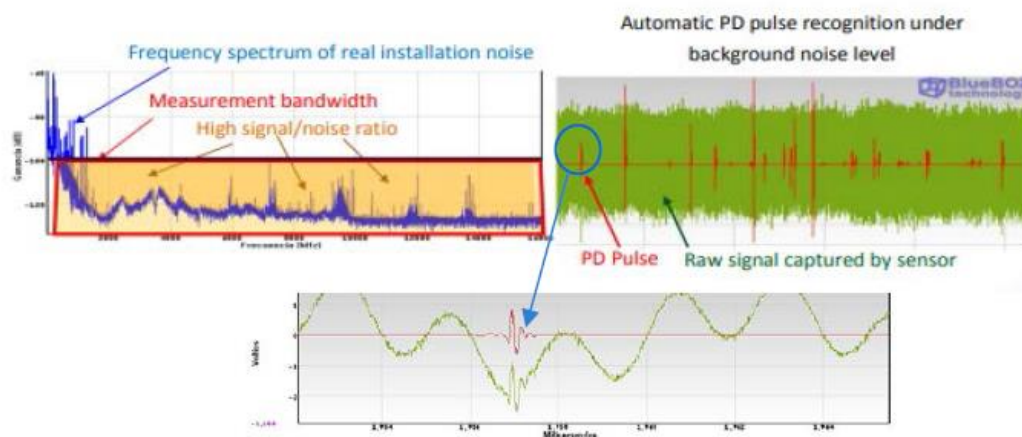
Različiti alati za analizu se često koriste za detekciju PP pomešanih sa šumom instalacije, za lociranje PP duž kablova i kablovskog pribora, za grupisanje različitih fenomena koji se mogu pojaviti na istom mestu i za prepoznavanje fazno rešene PP šeme koja identifikuje vrstu kvara. Nisu svi od njih dostupni u svim slučajevima, niti su uvek automatski. Za korišćenje nekih od

tih alata ponekad su potrebni dodatni resursi kao što su senzori, instrumenti, izvori, takođe može biti potrebno isključiti sistem (off-line test) kako bi se izvršila dobra analiza sa nekim od alternativnih metoda.

I većina njih zahteva visoku stručnost za obavljanje dijagnoze [3][4][6].

Preporučene metode i analize koje su razvijene za dijagnostiku čvrste izolacije visokonaponske opreme su date u koracima:

1. U prvom koraku vrši se sinhronizovano merenje sa svim HFCT (High Frequency Current Transformer) senzorima postavljenim na strateškim tačkama visokonaponske opreme pod nadzorom. Sinhronizacija mernih jedinica može se ostvariti putem optičkog vlakna ili vremenske reference koordinisanog univerzalnog vremena (CUT) pomoću GPS mreže.
2. U drugom koraku se uklanja prekomerni pozadinski šum koji je detektovan korišćenjem snažnog digitalnog filtera zasnovanog na talasnoj transformaciji, uz statističku analizu. Softver može da meri parcijalna pražnjenja nezavisno od postojećih električnih šumova i smetnji, tj. može da detektuje pražnjenja unutar električnih smetnji kada eliminacija istih nije moguća.



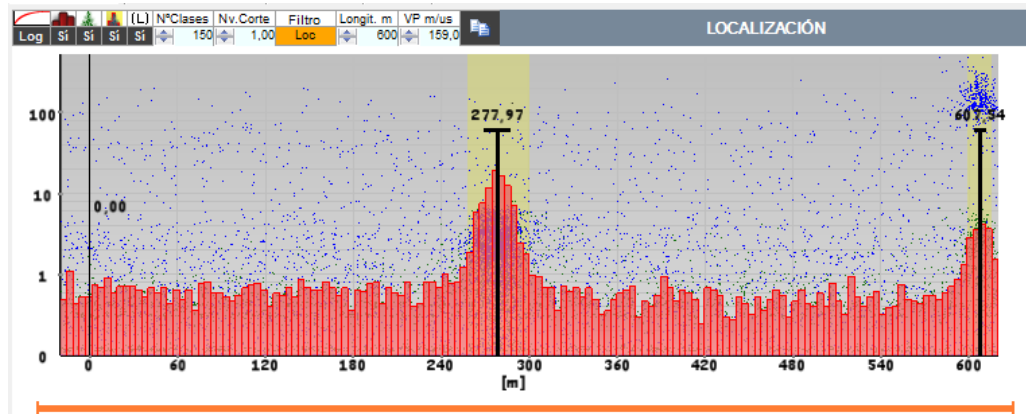
Slika 1: Automatska diskriminacija pozadinskog šuma

3. U trećem koraku se primenjuje alat za lokalizaciju (PP mapiranje) na filtrirane podatke. Pozicija svakog PP izvora se određuje uzimajući u obzir vremenski period Δt_i između vremena dolaska korelisanih PP impulsa na različite HFCT senzore. Impuls koji je izmeren jednim HFCT senzorom je u korelaciji sa drugim impulsom koji je izmeren na drugom HFCT-u, kada je kašnjenje u vremenima dolaska Δt_i niže od vremena propagacije impulsa između senzora t_w , definisanog formulom (1).

$$t_w = \frac{L}{V} \quad (1)$$

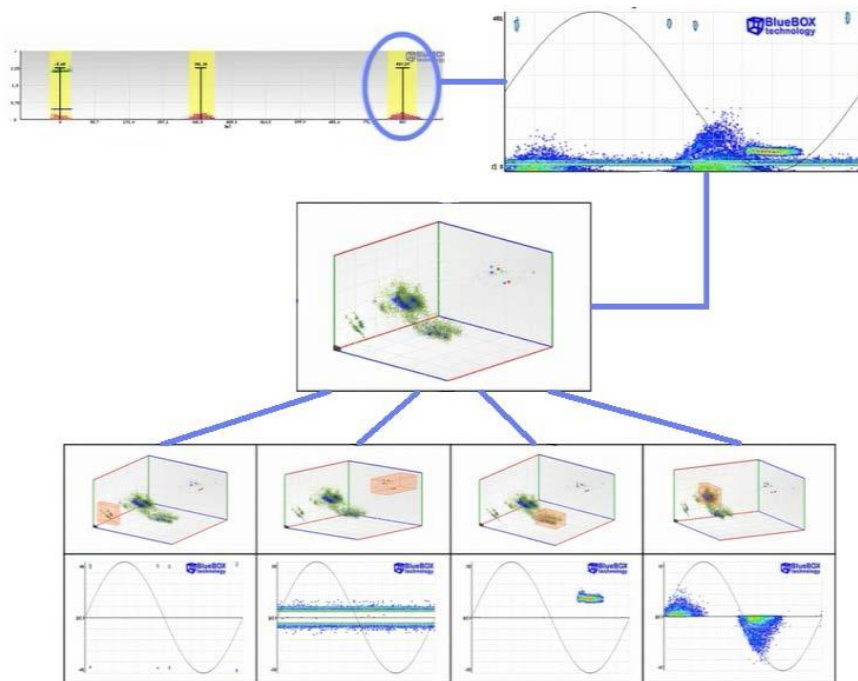
gde je L udaljenost između senzora, a V brzina propagacije signala. Poznavanjem Δt_i , vremena propagacije t_w i dužine kabla L , lokacija izvora impulsa $x_i(\Delta t_i)$ u odnosu na poziciju jednog senzora se utvrđuje sledećim izrazom:

$$x_i(\Delta t_i) = \frac{L}{2} \left[1 - \left(\frac{\Delta t_i}{t_w} \right) \right] \quad (2)$$



Slika 2: Automatska lokalizacija parcijalnih pražnjenja duž kabla

4. U četvrtom koraku primenjuje se alat za grupisanje kako bi se odvojili izvori impulsa koji se nalaze na istom mestu pomoću prethodno korišćenog alata za analizu. U ovom koraku, talasna forma svakog detektovanog impulsa karakteriše se sa tri parametra: glavna frekvencija i dva parametra oblika. Izračunate vrednosti ovih parametara predstavljene su u 3D dijagramu na kojem se različiti klasteri razlikuju. Svaki od formiranih klastera odgovara različitom izvoru PP. Odabirom klastera, dobijaju se fazno rešene PP (PRPD) mape odgovarajućih impulsa (slika 3).

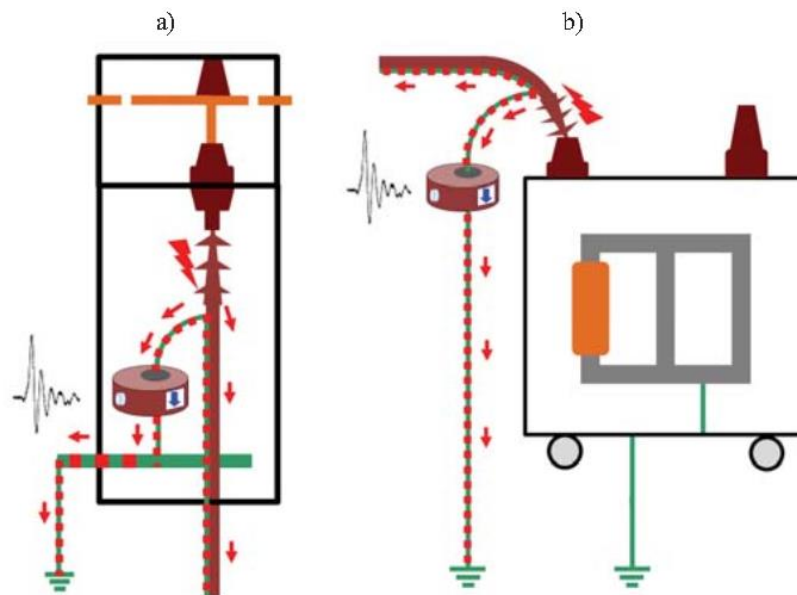


Slika 3: Prikaz grupisanih impulsa parcijalnih pražnjenja

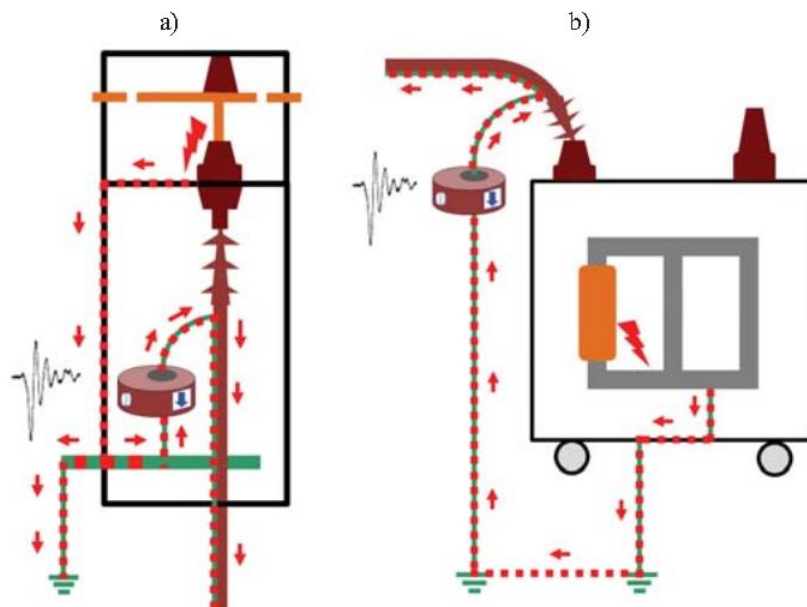
5. Za svaki pojedinačni PP izvor dobijen nakon primene koraka 3 i 4, identifikacija oštećenog elementa se određuje analizom polariteta impulsa PP. Na primer, za raspored

senzora postavljenih ekranu kabla kada je kvar u završnici kablovskog voda (slike 4a i 5a), impulsi PP zabeleženi u pozitivnoj polovini perioda referentnog naponskog signala imaju pozitivni polaritet.

Međutim, kada je kvar unutar prekidača ili transformatora (slike 5a i 5b), impulsi detektovani u pozitivnoj polovini perioda imaju negativni polaritet. Polariteti impulsa se menjaju jer putanja od izvora PP do HFCT senzora nije ista. Na slikama. 4 i 5, trajektorija impulsa kroz zaštitu kablovske žile i zemljane spojeve prikazana je crvenom isprekidanom linijom.



Slika 4: a) Defekt izolacije u završetku kabla povezanog sa HV prekidačem. b) Defekt izolacije u završetku kabla povezanog sa energetske transformatorom.



Slika 5: a) Defekt izolacije u HV prekidaču. b) Defekt izolacije u energetske transformatoru.

6. Za svaki pojedinačni izvor pražnjenja, poznavajući oštećeni element i analizirajući rezultat individualne PRPD mape, može se efikasno odrediti vrsta defekta izolacije.

Prepoznavanje defekata omogućava procenu rizika od kvara povezanog sa oštećenim elementima.

S obzirom na širok spektar dostupnih opcija, neophodno je uspostaviti dobru strategiju koja omogućava minimiziranje troškova potrebnih za primenu prediktivnog održavanja korišćenjem ovog tipa testova. Jedna od strategija koju može usvojiti operator presnog sistema podeljena je na dva nivoa: detekcija i lokacija.

2.1 Detekcija parcijalnih pražnjenja

Na ovom nivou je potrebno samo vršiti praćenje kako bi se detektovali postojeći kvarovi na instalaciji (kابلu iil priboru, prekidačima, GIS postrojenju, transformatorima). Glavni cilj je da se pokrije maksimalan broj objekata uz minimalni napor i dobru osetljivost. Kao rezultat ove prve evaluacije, trebalo bi da se dobiju informacije za:

- Odbacivanje opreme sa ili bez PP koja nisu opasna za izolacioni sistem.
- Identifikaciju objekata sa višom PP aktivnošću i uključenje plana preventivnih akcija.
- Identifikaciju objekata sa naprednim ili kritičnim kvarovima koji treba da se lociraju (Nivo 2) i poprave.
- Identifikacija objekata sa početnim kvarovima koji treba da se prate.

Važno je napomenuti da zavisno od vrste izolacije kabla (XLPE, EPR, PILC i slično) kriterijumi za određivanje šta je napredno ili početno stanje mogu da se promene.

2.2 Lokacija parcijalnih pražnjenja

Cilj ovog nivoa je lociranje kvarova pomoću automatskih alata za analizu, koje će obavljati tehničari u službi za održavanje bez pomoći dijagnostičara za parcijalna pražnjenja. Pored alata koji se koriste na Nivou 1, biće potrebna:

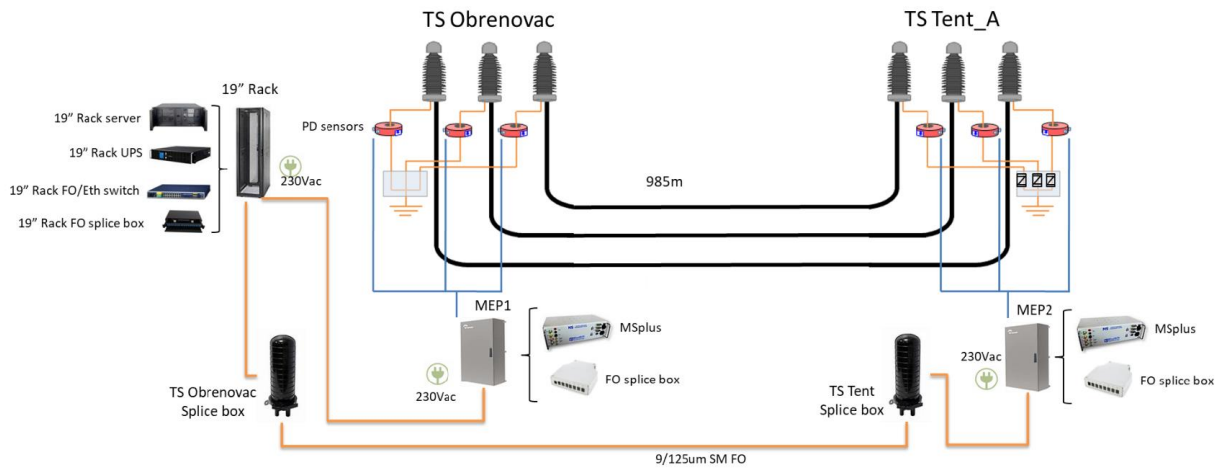
- a) Automatska identifikacija polariteta impulsa za određivanje pogođenog dela kabla.
- b) Automatska identifikacija PP izvora lociranih duž kablovskog sistema.

3 ARHITEKTURA SISTEMA

Kontinualni monitoring sistem čini nekoliko uređaja. Akviziciona jedinica ima ulogu da prikuplja i procesira signale parcijalnih pražnjenja koji se detektuju lokalno pomoću senzora montiranih na kablovskim završnicama. Na ovom projektu postoje dva merna mesta, jedan na početku, drugi na kraju 110 kV podzemnog kablovskog voda.

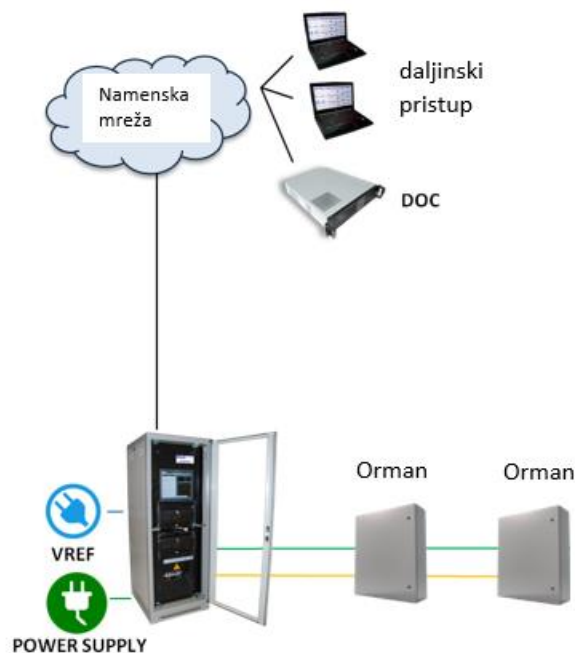
Na svakom mernom mestu, montiran je orman u kome se smešta akviziciona jedinica. Akviziciona jedinica detektuje i prikuplja signale preko HFCT senzora, dok fiber optička komunikaciona mreža povezuje svaku akvizicionu jedinicu (lociranu unutar ormana) sa lokalnim serverom montiranim u 19" reku, koji se nalazi u trafo stanici.

Arhitektura čitavog sistema, koji služi kao pilot projekat, prikazana je na slici 7. Ista oslikava izvedeno stanje monitoringa na kablovskom vodu 110 kV koji povezuje TS Obrenovac i TS Obrenovac SP.



Slika 6: Arhitektura kontinualnog monitoring sistema

Centralna jedinica (server) je smeštena u kontrolnu prostoriju u poseban rek orman. Sastoji se od CPU i zaštitnog sinhronizacionog sistema. Uloga mu je kontrola, sinhronizacija, primanje, procesiranje i analiza podataka prikupljenih od strane sistema za merenje, i skladištenje tih podataka. Blok šema povezivanja sistema sa centralnom jedinicom je prikazan na slici 7.



Slika 7: Blok šema povezivanja sistema sa centralnom jedinicom

4 HFCT SENZOR

Visokofrekventni strujni obuhvatni transformatori (HFCT) su senzori koji se obično koriste za merenje parcijalnog pražnjenja, međutim, u nedostatku standarda primene, karakteristike koje treba da imaju ovi senzori nisu dobro poznate [5]. Šest najvažnijih karakteristika koje senzori moraju da zadovolje su sledeće:

1. Prenosna impedansa bolja od 8 mV/mA u opsegu merenja od 1 MHz do 30 MHz.
2. Sposobnost samoprovere pomoću pomoćne zavojnice za injekciju signala.
3. Zaštita od smetnji bolja od -40 dB, za frekvencije do 30 MHz kako bi se ograničile smetnje.
4. Dielektrična čvrstoća veća od 10 kV pri 50 Hz.
5. Dobre performanse u pogledu korozije.



Slika 6: Novi visokofrekventni senzor

4.1 Prenosna impedansa senzora

Definiše se kao prenosna funkcija izlaznog napona u odnosu na ulaznu struju kada je izlaz opterećen impedansom od 50Ω . Neki senzori koji imaju visoku prenosnu impedansu (npr. > 8 mV/mA) u frekventnom opsegu od 1 MHz do 30 MHz nisu u stanju da je održe konstantnom u ovom visokom frekventnom opsegu, što uzrokuje izobličenje talasne forme pulsa parcijalnog pražnjenja koji treba da se meri. Drugi senzori koji održavaju konstantnu prenosnu impedansu u interesantnom frekventnom opsegu imaju nisku prenosnu impedansu (< 5 mV/mA).

Senzor dizajniran i izgrađen na optimizovan način mora održavati visoku prenosnu impedansu zavisno od frekvencije sa ravnim odzivom ($< \pm 10\%$) u interesantnom frekventnom opsegu između 1 MHz i 30 MHz, koji ima prenosnu impedansu od 8,3 mV/mA zahvaljujući svom posebnom dizajnu i idealnom odabiru materijala.

4.2 Sposobnost samoprovere

Važno je da senzor ima pomoćnu zavojnicu za injekciju kalibracionog impulsa, jer događaji u visokonaponskoj opremi, kao što su kratki spojevi, komutacioni prenaponi ili atmosferska pražnjenja, mogu prouzrokovati oštećenje jezgra senzora, što dovodi do degradacije njegove magnetizacione karakteristike i promena u njegovoj prenosnoj impedansi. Pomoćna zavojnica omogućava injekciju kontrolnog impulsa bez demontaže senzora. Iako postojanje ove pomoćne zavojnice smanjuje amplitudu i frekvencijsku reakciju senzora, otpor u seriji sa zavojnicom za samoprovjeru, ograničava ovaj štetan efekat.

4.3 Visok imunitet na smetnje

HFCT tip senzora koji se koristi za kontinuirano praćenje parcijalnih pražnjenja u visokonaponskim mrežama pod radnim uslovima izložen je visokim električnim poljima, u rasponu od desetina volti po metru. Stoga, neophodno je imati metalnu zaštitu kako bi se izbegle elektromagnetne smetnje.

4.4 Visoka dielektrična čvrstoća izolacije

Spoljni metalni štitnici, lakirani ili prekriveni lakom, efikasni su u pogledu elektromagnetnog imuniteta, ali su nedovoljni sa stanovišta električne izolacije, jer abrazija ili oštećenje boje ili laka može dovesti do pojave opasnih napona, ugrožavajući integritet mernog instrumenta, pa čak i operatera koji ga koristi. Zaštita unutrašnjom bakarnom zaštitom debljine nekoliko milimetara (>3 mm) od epoksi smole osigurava električnu izolaciju koja premašuje 10 kV pri 50 Hz, što može nastati u uzemljenim masama visokonaponske opreme i instalacija.

4.5 Antikorozivna svojstva

Senzori uliveni u smolu imaju kompaktnu i robusnu konstrukciju koja je otporna na efekte korozije, jer nema spoljnih metalnih delova izloženih korozivnim atmosferskim agensima koji se mogu pojaviti u instalaciji gde je senzor postavljen.

5 IZAZOVI U IMPLEMENTACIJI I EKSPLOATACIJI

Iskustvo koje je stečeno u implementaciji ovog sistema ukazuje da je u fazi investicionog planiranja potrebno izdvojiti sredstva za opremu i radove. Na taj način će se izbeći dodatne aktivnosti na potencijalnim građevinskim radovima i obezbediće se da u momentu puštanja kablovskog voda u pogon budu zabeleženi prvi rezultati.

Oprema koja se ugradi može da se koristi i za off-line ispitivanje ukoliko postoje adekvatni izvori snage koji bi obezbedili nominalni napon kablovskog voda.

Sama investicija nije značajna obzirom na vrednost investicionog projekta i direktne i indirektne troškove sanacije kvara na kablovskom vodu.

Tokom eksploatacije sistema za monitoring parcijalnih pražnjenja (PP), mogu se javiti brojni tehnički, organizacioni i operativni problemi koji utiču na tačnost i pouzdanost detekcije, kao i na celokupnu efikasnost održavanja elektroenergetske opreme. Neki od najčešćih problema uključuju:

- Uticaj elektromagnetnih smetnji (EMI) – U realnim uslovima rada, naročito u trafostanicama i visokonaponskim postrojenjima, prisutan je visok nivo elektromagnetnog šuma koji može ometati PP signale i izazvati pogrešne interpretacije. Ovo zahteva kvalitetnu filtraciju i kalibraciju sistema.
- Degeneracija senzora i opreme – Vremenom dolazi do starenja senzora, gubitka kalibracije i smanjenja njihove osetljivosti, što može dovesti do nepouzdanih očitavanja i potrebe za redovnim servisiranjem ili zamenom.
- Nedostatak obuke i iskustva – Eksploatacija sistema zahteva stručno osoblje koje zna pravilno tumačiti rezultate. U suprotnom, sistem može biti zanemaren ili se podaci mogu pogrešno koristiti, što anulira njegovu svrhu.

- Zanemarivanje održavanja sistema – Ironično, i sam PP monitoring sistem mora biti predmet redovnog održavanja.

6 ZAKLJUČAK

Iako je investicija u ovakav sistem značajna, koristi su višestruke: produžen vek trajanja opreme, smanjenje zastoja, smanjenje troškova neplaniranih intervencija i povećana sigurnost. Implementacija sistema za monitoring PP je stoga deo šire strategije preventivnog i prediktivnog održavanja u modernim elektroenergetskim sistemima.

Za budućnost, treba se suočiti sa nekoliko izazova kako bi se proširila monitoring mreža PP: automatska analiza i interpretacija PP korišćenjem veštačke inteligencije i istraživanje tehnoloških rešenja za trenutna ograničenja u merenju PP.

7 LITERATURA

- [1] IEC/TS 62478-2015 “High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods”.
- [2] F. Garnacho, M. Sánchez-Úran, J. Ortego, J. Moreno, F. Álvarez, O. Perpiñan, J.L. Vallejo, J. Gonzalo, 2011, "PD monitoring system for H.V. cables by means of powerful digital tools to discriminate noise
- [3] CIGRE Working Group DL33., “HV On-Site Testing with Partial Discharge Measurement”, Electra Brochure, June 2012.
- [4] F. Garnacho, M. A. Sánchez-Urán, J. Ortego, F. Álvarez, A. González, 2013, "Control of Insulation Condition of Smart Grids by Means of Continuous PD Monitoring", Proceedings CIRED conference, Stockholm, Sweden.
- [5] A. Haddad, D.F. Warne, “Advances in High Voltage Engineering”, 2nd ed., IET Power and Energy Series, IET: London, UK, 2007; pp.37–190.
- [6] F. Álvarez, J. Ortego, F. Garnacho and M.A. Sánchez-Urán, 2015, “A Clustering Technique for Partial Discharge and Noise Sources Identification in Power Cables by Means of Waveform Parameters”, IEEE DEIS.