

STRATEGIJA PREVENTIVNE KONTROLE MERNIH TRANSFORMATORA: ON-LINE AKUSTIČNA METODA MERENJA PARCIJALNIH PRAŽNENJA UZ PODRŠKU GASNOHROMATOGRFSKE ANALIZE ULJA

D. Teslić, Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla", Beograd

A. Bojković,
S. Marinković,
M. Belčević,
S. Đurović,
S. Milosavljević,
S. Teslić

Kratak sadržaj: U radu je prikazan pregled rezultata ispitivanja prisustva parcijalnih pražnjenja izvršenih tokom 2007. godine kod preko 300 strujnih i naponskih mernih transformatora, različitih proizvođača, u 110 kV TS, vlasništvo PD ELEKTROSRBIJA.

Merenja na terenu su izvedena akustičnom metodom i u radu je dat prikaz i analiza dobijenih merenja. Na osnovu obrade dobijenih rezultata kod određenog broja transformatora urađena je gasnohromatografska analiza gasova rastvorenih u ulju i dat je komparativni prikaz ove dve metode u detekciji parcijalnih pražnjenja. U radu je pokazan značaj ovakve komplementarne strategije u preventivnoj kontroli mernih transformatora. Na ovaj način omogućen je brz i masovan pregled transformatora akustičnom metodom u cilju detekcije trenutnog prisustva parcijalnih pražnjenja dok je potvrda omogućena pouzdanom metodom gasne hromatografije.

Ključne reči: Merni transformatori, parcijalna pražnjenja, on-line merenje, gasnohromatografska analiza, statistička analiza

UVOD

Tokom eksploatacije mernih transformatora (MT) dolazi do degradacija izolacionog sistema a jedna od manifestacija ovog procesa, usled postojanja slabih mesta, je pojava parcijalnih pražnjenja. Parcijalna pražnjenja (PP) predstavljaju električni fenomen koji se javlja u transformatoru kada je naponski nivo dovoljno visok da proizvede jonizaciju i parcijalno premosti izolaciju između provodnika. Kod ovakvih pražnjenja međuelektrodni razmak je samo delimično premošćen i ne dolazi do potpunog električnog proboja izolacije. U početnoj fazi degradacije izolacionog materijala nivo i aktivnost parcijalnih pražnjenja su mali, ali svaka pojava parcijalnih pražnjenja dodatno oslabljuje izolacioni materijal. Vremenom, aktivnost i intezitet parcijalnih pražnjenja rastu, tako da može doći do kvara ili havarije. U nekim slučajevima, brzina porasta inteziteta i aktivnosti parcijalnih pražnjenja može biti vrlo velika, odnosno kvar se može desiti vrlo brzo posle pojave značajnijeg nivoa parcijalnih pražnjenja. Razvoj aktivnosti parcijalnih pražnjenja i njihov značajan nivo, dakle, ukazuje na razvoj kvara u izolacionom

sistemu transformatora. Ispitivanje aktivnosti i nivoa parcijalnih pražnjenja u transformatoru ima značajan potencijal u dijagnostici stanja izolacionog sistema i prevenciji havarija. Aktivnosti parcijalnih pražnjenja praćene su emitovanjem elektromagnetnog talasa sa spektrom visoke učestanosti. Razvijeno je više tehnika za detekciju aktivnosti parcijalnih pražnjenja, tako da se osnovne metode mogu podeliti na:

1. električne
2. akustične
3. hemijske i
4. optičke (teško primenljive za transformatore pa neće biti analizirane)

Električne metode su bazirane na detekciji električnog impulsa nastalog usled struje PP u lokalnoj deformaciji dielektrika (šupljini). Osnovna prednost ove metode je mogućnost otkrivanja tipa kvara kao i obima oštećenja izolacije. Podložnost elektromagnetnim smetnjama u postrojenjima i zavisnost dobijenog signala od geometrije transformatora predstavljaju ograničenja navedene metode.

Akustično ispitivanje beleži zvučni signal koji nastaje kao posledica rasipanja energije na materijal oko šupljine, koja je inicijator PP, što dovodi do naglog porasta mehaničke energije, koja se zatim prenosi do suda transformatora u obliku polja pritiska, tj zvuka.

Hemijske metode zasnovane su na detekciji gasova nastalih intenzivnom degradacijom okolnog ulja usled električnog naprezanja nastalog PP. Karakteristični gasovi, nastali degradacijom ulja, koji ukazuju na prisustvo PP su: vodonik (H_2), metan (CH_4) i etan (C_2H_6). Pored merenja apsolutnih vrednosti koncentracija gasova, značajno je i određivanje brzine porasta, tj. trend analiza. Trend analiza jasnije ukazuje na intenzitet razvoja kvara što je vezano sa obimom razaranja izolacionog sistema transformatora.

Ako se problemi pojave fenomena PP ne detektuju i ne preduzmu odgovarajuće mere, u najvećem broju slučajeva jačina i frekvencija parcijalnih pražnjenja raste i dovodi do katastrofalnih havarija transformatora praćenih eksplozijom.

Pouzdana detekcija aktivnosti PP je kritičan zahtev vezan za pogonsku spremnost i pouzdanost mernih transformatora, što ima veliki značaj u prenosu i distribuciji električne energije u cilju poboljšanja bezbednosti i smanjenju neplaniranih isključenja i direktne materijalne štete u postrojenju.

U određenom broju slučajeva kod mernih transformatora, pored PP, dolazi do pojave termičkih kvarova. Njihov značaj vezan je sa relativno malim dozvoljenim porastom temperature kod MT (dozvoljeni ΔT zavisi od klase izolacije, uobičajeno je oko $50-60^\circ C$). Termički kvar može da uključuje temperature i preko $700^\circ C$ što ozbiljno ugrožava izolacioni sistem i skraćuje radni vek transformatora. U detekciji toplotnih kvarova se koristi termovizijski pregled transformatora i gasnohromatografska analiza gasova nastalih u ulju. U radu neće biti razmatrani termički kvarovi.

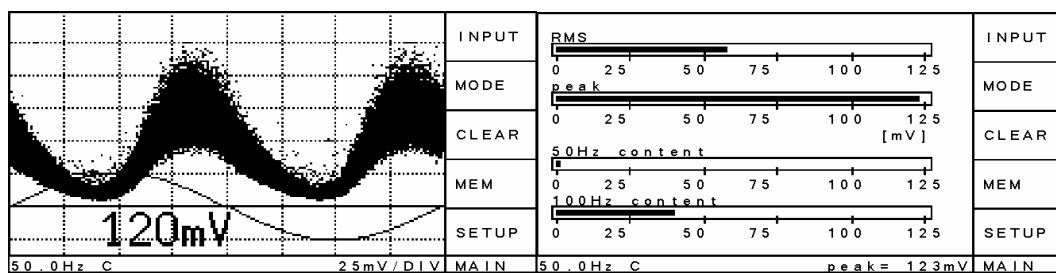
PREVENTIVNA KONTROLA MERNIH TRANSFORMATORA: AKUSTIČKI PREGLED UZ PODRŠKU GASNE HROMATOGRAFIJE ULJA

U praksi je, u cilju preventivne kontrole, u upotrebi više metoda:

- vizuelni pregled, pri kome se na prvom mestu obraća pažnja na stanje membrane (da li postoje znaci oštećenja membrane usled uvećanog pritiska nastalih gasova kvara, u tom slučaju je moguće "oticanje" gasova iz ulja i relativno niske koncentracije u odnosu na nivo PP), promenu boje ulja ili curenje ulja.
- merenje izolacionih otpora, uz određivanje polarizacionog indeksa,
- merenje faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta,
- termovizijska kontrola,
- gasnohromatografska analiza gasova rastvorenih u ulju,
- akustično ispitivanje parcijalnih pražnjenja.

U radu je prikazana strategija preventivne kontrole MT kombinacijom dve metode: akustičnog pregleda transformatora i gasnohromatografske analize ulja.

Akustična metoda zasnovana je na merenju zvučnih efekata koji se javljaju samo u trenutku dešavanja PP, tako da se ovom metodom mogu dijagnostikovati samo trenutna PP. Ova metoda konkuriše za primat u otkrivanju glavne vrste kvara na mernim transformatorima najviše zbog mogućnosti brzog pregleda MT bez potrebe isključenja istog sa mreže. Pored toga pregled velikog broja MT ne zahteva značajna materijalna izdvajanja. Izlazni signal koji je srazmeran intenzitetu PP i prikazan je na slici 1.



SLIKA 1 - Akustični snimak pojave PP kod MT

Ograničenja ovakve metode su ograničena mogućnost primene (ne obuhvata sve tipove MT – npr. inverzni) i što ne ukazuje na obim oštećenja izolacije. Zbog činjenice da ova metoda određuje trenutno stanje, ne može odrediti da li su PP prolazna ili trajnog, razornog karaktera. Prolazna PP mogu nastati npr. usled prenapona, koja se po prestanku delovanja prenapona gase.

Gasnohromatografska kontrola sadržaja gasova u ulju, nastalih kao posledica PP, se pokazala kao izuzetno efikasna metoda u otkrivanju ovakve vrste kvarova. Prednosti ove metode su univerzalnost u primeni (obuhvata sve tipove MT), širok spektar kvarova koje otkriva i velika pouzdanost. Na ovaj način se meri kumulativan efekat PP kroz vreme, tj. ulje "pamti" događaje, tako da se na osnovu izmerenih koncentracija gasova ne može pouzdano reći o vremenu nastanka, trajanju i intenzitetu PP. Visoke koncentracije gasova u ulju mogu nastati dugotrajnim delovanjem umerenih, pa čak i relativno slabih PP, a sa druge strane mogu biti posledica veoma intenzivnih PP koja u kratkom periodu mogu dovesti do razornih efekata. Zbog toga se o intenzitetu PP prema rezultatima GH analize može suditi samo ako se uzastopnim merenjima pouzdano utvrdi brzina porasta koncentracija gasova, a ne na osnovu apsolutnih vrednosti koncentracija. U tabeli 1. prikazani su primeri praćenja pojave PP merenjem gasova rastvorenih u ulju.

TABELA 1 - Primeri pojave PP praćenjem koncentracija gasova u ulju

primer br.	MT	godina ispitivanja	koncentracije gasova, ppm		
			H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
1	SMT, 110 kV	2003	12	3	1
		2005	23444	10	1262
2	SMT, 110 kV	2003	2918	1339	776
		2006	3687	1839	962
		2007	7083	2039	1153

Iz tabele 1 se vidi da je kod transformatora u primeru 1 velika količina gasova nastala u periodu od dve godine što ukazuje na postojanje intenzivnih PP sa razornim dejstvom na izolaciju. Kod primera 2 uočava se postepeni porast koncentracija gasova iz čega proizilazi da su kod ovog transformatora duži niz godina bila prisutna PP slabijeg intenziteta.

Ograničenja gasne hromatografije su potreba za isključenjem transformatora i opreznost prilikom uzorkovanja. Raniji nedostaci ove metode vezani za potrebnu količinu uzorkovanog ulja i relativno visoku cenu izvođenja analize su prevaziđeni korišćenjem gasnog hromatografa nove generacije (head space tehnika ekstrakcije gasova, gasni hromatograf sa auto-samplerom), tako da je potrebna količina uzorka je oko 10 ml.

Nijedna od dve napred navedene metode ne meri neposredno stvarni intenzitet PP, koji se najpribližnije određuje električnim merenjem prividnog naelektrisanja u pC. Ne postoji ustanovljena korelacija između rezultata električnih merenja prividnog naelektrisanja i rezultata gasnohromatografske ili akustičke kontrole. Međutim, zbog velikih smetnji u postrojenjima 110 kV i visokih napona, električna merenja prividnog naelektrisanja u pC su teško ostvarljiva.

Kod obe metode granične vrednosti zavise od tipa transformatora. Npr. različite granične vrednosti karakteristične su za različite proizvođače i tipove strujnih i naponskih MT.

REZULTATI PRIMENE KOMBINOVANE STRATEGIJE DETEKCIJE PP

Kobinovanjem akustične metode i gasnohromatografske metode detekcije PP mogu se prevazići glavna pojedinačna ograničenja metoda, tj. omogućava se praćenje pojave PP i u vremenu (trenutno stanje) i kroz vreme (kumulativno) na osnovu čega se PP mogu preciznije definisati po intenzitetu i potencijalnom pogonskom riziku.

Početakom 2007. godine Institut „Nikola Tesla“ izvršio je ispitivanje velikog broja strujnih i naponskih mernih transformatora u transformatorskim stanicama 110 kV u vlasništvu PD ELEKTROSRBIJA. Akustičnom metodom ostvaren je brz i masovan pregled aktivnosti parcijalnih pražnjenja na MT bez isključenja TS, pri čemu je ispitano 306 transformatora.

Rezultati akustičnih ispitivanja obrađeni su statistički uz korišćenje normalne Gausove raspodele i odgovarajućeg kriterijuma selekcije rezultata. Na ovaj način su dobijene grupe sumnjivih MT po tipovima transformatora (Tabela 2), kojima je preporučena gasnohromatografska analiza ulja, u cilju potvrde prisustva PP i određivanja količine nastalih gasova. Objedinjavanjem zbirnih rezultata akustičnih merenja s jedne strane i gasnohromatografske analize s druge strane, izvršena je procena pogonskog rizika MT.

TABELA 2 - Rezultati statističke obrade akustičkih merenja PP

Tip MT	Broj ispitanih MT	Broj sumnjivih MT
TPE 11c	116	10
TPE 11b	6	0
UH 11-15	87	4
APU 123	48	2
VPU 123	26	10
MBH 123	14	0
UTD 123	2	0
IMB 123	4	0
EGF 123	3	2
Σ	306	28

Na osnovu analize rezultata merenja PP urađena je gasnohromatografska analiza sumnjivih transformatora. U tabeli 3 su prikazani uporedni rezultati GH analize uzoraka analiza gasova rastvorenih u ulju i visine akustičnog signala.

TABELA 3 - Primeri sa povećanim PP potvrđeno sa GH i akustičnom metodom (PP)

Tip MT	Koncentracije gasova (ppm)			Ocena GH	Akustično merenje PP (mV)
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆		
TPE 11C	9369	225	2	Cpp	125,0
TPE 11C	3923	723	138	Cpp	125,0
TPE 11C	15733	1786	483	Cpp	125,0
TPE 11C	26842	2510	112	Cpp	117,0
TPE 11C	11408	704	1822	Cpp	100,0
TPE 11C	17534	2567	129	Cpp	90,0
TPE 11C	25536	10143	1380	Cpp	82,6
APU 123	18599	4169	762	Cpp	50,5

U cilju potvrde ispitivanja akustičnom metodom urađena je gasnohromatografska analiza kod određenog broja MT koji su ocenjeni kao ispravni, odnosno kod kojih je izmeren nizak akustični signal. Rezultati su prikazani u tabeli 4.

TABELA 4 - Primeri sa niskim PP potvrđeno sa GH i akustičnom metodom (PP)

Tip MT	Koncentracije gasova (ppm)			Ocena GH	Akustično merenje PP mV
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆		
TPE 11c	171	5	17	A	5,0
TPE 11c	65	53	59	A	4,0
TPE 11c	60	51	51	A	3,5
TPE 11c	145	5	1	A	4,0
TPE 11c	278	103	376	A	4,0
APU 123	63	11	12	A	3,0
APU 123	50	16	33	A	3,0
EGF 123	16	2	0	A	7,0
EGF 123	15	2	0	A	25,0
EGF 123	23	3	2	A	16,5

Na osnovu izvedenih kombinovanih merenja mogu se izvesti sledeći zaključci:

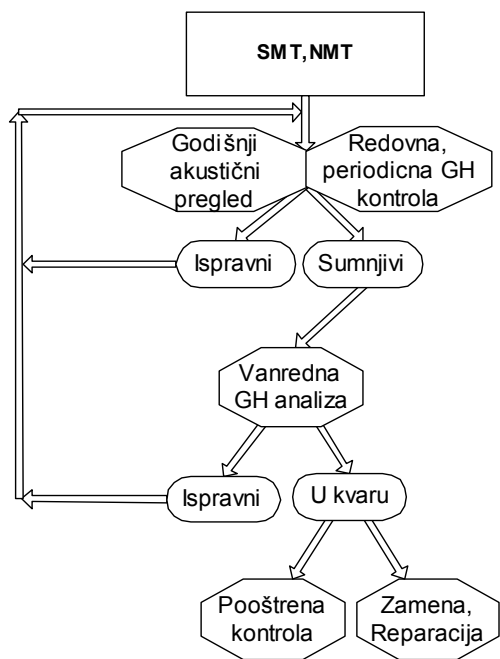
1. Akustična merenja su potvrđena povišenim sadržajem gasova u ulju kod većine sumnjivih MT
2. Najveći broj sumnjivih transformatora, kod kojih je i potvrđeno prisustvo PP gasnom hromatografijom su SMT. To potvrđuje činjenicu da su SMT izloženi bržoj degradaciji izolacije zbog svoje funkcije pa samim tim i u većem riziku po pitanju pojave PP.
3. Kombinovanjem metoda otkriveni su transformatori sa intenzivnim PP u začetku (Tabela 3) - transformator TPE 11C, drugi red.
Iz tabele se vidi da su koncentracije nastalih gasova još uvek srednjeg nivoa dok je izmereni akustični signal visok (iznad granice detekcije uređaja) što ukazuje na postojanje intenzivnih PP u MT i povećan pogonski rizik. Preporučena mera za ovakav slučaj je pooštreno praćenje kombinovanjem metoda čime bi se tačnije definisao pogonski rizik analiziranog MT.
4. Kod transformatora ocenjenih kao ispravni prema akustičnoj metodi, čije ulje je analizirano gasnom hromatografijom u cilju potvrde kompatibilnosti metoda (10 transformatora), dobijeno je potpuno slaganje sa rezultatima gasnohromatografske analize (Tabela 4)
5. Kod kapacitivnih naponskih transformatora (u konkretnom slučaju tipa MBH-123) zbog otežanog prostiranja zvuka iz delitelja ka mestu na koje se postavlja merna sonda, merenje PP akustičnom metodom je kompleksnije. Samo merenje je neophodno izvesti u tačno definisanom opsegu frekvencija zvučnog talasa čime se odstranjuju smetnje izazvane koronom i drugim uticajima.
6. Kod naponskih MT tipa VPU-123 nije dobijeno zadovoljavajuće slaganje visine akustičnog signala i sadržaja nastalih gasova koji bi ukazivali na postojanje PP. Potrebno je razmotriti adaptaciju akustične metode specifičnostima konstrukcije ovog tipa MT. Gasovi rastvoreni u ulju MT tipa VPU - 123 više su ukazivali na prisustvo povećanog grejanja, što je u skladu sa ranijim iskustvima sa ovim tipom transformatora, tako da se pored redovnog ispitivanja prisustva PP akustički i gasnom hromatografijom, preporučuje i učestala termovizijska kontrola.
7. Kombinovanjem metoda mogu se detektovati prolazna PP kod MT i nivo oštećenja koja su izazvala.

TABELA 5 - Primer MT sa detektovanim prolaznim PP

Akustično merenje		Gasnohromatografska analiza			
godina	signal u (mV)	datum	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
2007	90	31/03/2008	185	9	1
2008	7				

Iz tabele 5. se može zaključiti da su akustičnim ispitivanjem iz 2007. godine izmerena PP relativno visokog intenziteta nastala usled prenapona, prolaznog karaktera (ponovljenim akustičnim merenjem iz 2008. godine dobijen je signal malog intenziteta). Na osnovu GH analize iz 2008. godine utvrđeno je da ispitani transformator nije pretrpeo značajnija oštećenja izolacionog sistema, pa se može reći da nije u povećanom pogonskom riziku.

Na osnovu iznesenog data je preporuka preventivne periodične kontrole MT (šematski prikazano na Dijagramu 1). Godišnji pregled MT akustičnom metodom preporučen je kod svih tipova SMT i kod određenih tipova NMT. Nakon statističke obrade rezultata i definisanja iskustvenih graničnih vrednosti za svaki pojedinačni tip transformatora treba formirati grupu sumnjivih MT kod kojih je potrebno izvršiti vanrednu gasnohromatografsku analizu nastalih gasova. Analiza zbirnih rezultata pokazala bi pogonsko stanje i raspoloživost ispitanih transformatora.



Dijagram 1. Preporučena strategija preventivne kontrole mernih transformatora

Redovnu periodičnu gasnohromatografsku kontrolu ulja treba obavljati u periodima definisanim opštim preporukama (na tri do četiri godine) zbog veće pouzdanosti metode i šireg spektra detekcije kvarova.

ZAKLJUČAK

Glavni problem u pogonu kod mernih transformatora je pojava PP, koja razaraju izolaciju transformatora i uvećavaju pogonski rizik kako samog transformatora tako i celog postrojenja (trafo stanice). Pojava i razvoj PP ne mogu se predvideti što ukazuje na potrebu redovne periodične kontrole. Prikazana strategija kombinovanja dve metode detekcije PP – UZ pregled i gasnohromatografska analiza ulja, pokazali su se kao efikasni u pravovremenom otkrivanju kvara i eliminisanju pojedinačnih ograničenja metoda. Omogućeno je trenutno i kumulativno praćenje fenomena PP čime je definisan neposredan pogonski rizik. Na taj način je preventivna kontrola MT izvedena efikasno i brzo, bez potrebe isključenja transformatora, a konačne procene na osnovu objedinjenih rezultata daju pouzdan pregled stanja velikog broja MT.

LITERATURA

- (1) A. Bojković, 1993 "Obrada rezultata gasnohromatografske kontrole kapacitivnih naponskih transformatora ", R15-01, 21. savetovanje JUKO CIGRE
- (2) A. Bojković, 1995 "Obrada rezultata gasnohromatografske kontrole mernih transformatora sa uljno-papirnom izolacijom", R12-07, 22. savetovanje JUKO CIGRE
- (3) K. Drakić, J. Lukić, A. Popović, S. Gavrančić , 2005 "Primena instrumentalnih dijagnostičkih metoda za otkrivanje parcijalnih pražnjenja u cilju produženja radnog veka transformatora", R A2-12, 27. savetovanje JUKO CIGRE
- (4) A. Lazarević, 2003 "Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor", Thesis submitted for the Master of Science in Electrical Engineering, Blacksburg, Virginija, USA
- (5) IEC 60599/2007 Mineral oil impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis.