

Siniša Gazivoda, dipl. ing.
Končar - Institut za elektrotehniku, d.d.
sgazi@koncar-institut.hr

dr. sc. Antun Mikulecky, dipl. ing.
Končar - Institut za elektrotehniku, d.d.
amikul@koncar-institut.hr

DIJAGNOSTIKA DISTRIBUCIJSKIH TRANSFORMATORA

SAŽETAK

Dijagnostika distribucijskih transformatora utječe na prevenciju kvarova i prekida napajanja potrošača. Ona omogućuje planiranje održavanja i pravodobnu zamjenu transformatora, te samim time smanjuje troškove pogona. S tim ciljem se u praksi primjenjuju brojne dijagnostičke metode kojima se provjeravaju, odnosno procjenjuju stanja praktički svih bitnih dijelova transformatora kao što su izolacija transformatora, namoti, jezgra, provodnici, regulacijska sklopka i slično. U pravilu se na mjestu ugradnje transformatora primjenjuju električne dijagnostičke metode, dok se u fizikalno-kemijskom laboratoriju primjenjuju dijagnostičke metode temeljene na uzorcima materijala, kojima se analizira stanje transformatorskog ulja i papira. Opseg dijagnostičkih metoda kojeg treba primijeniti na pojedini distribucijski transformator ovisi o važnosti transformatora u mreži, te njegovoj snazi i starosti.

U radu je naveden pregled dijagnostičkih metoda te prijedlog njihove primjene na razne grupe distribucijskih transformatora.

Ključne riječi: dijagnostika energetskih transformatora, distribucijski transformator, dijagnostičke metode, ispitivanje na terenu, održavanje transformatora

DIAGNOSTICS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS

SUMMARY

The diagnostics of distribution transformers has an influence on the prevention of failures and interruptions of power supply to consumers. It enables scheduled maintenance and replacement of transformers, and consequently also reduces operation costs. Numerous diagnostic methods are applied in practice, enabling the checking or condition assessment of all vital transformer parts such as the insulation, windings, core, bushings, tap changer etc. As a rule, transformer electrical tests are used for transformer diagnostics on site. Chemical methods, based on material samples, for the analysis of the condition of transformer oil and paper are performed in the laboratory. The scope of diagnostics methods should be applied to a distribution transformer depending on the importance of the particular transformer in the network, and also on its rated power and age.

The paper gives a survey of transformer diagnostic methods and a proposal of their application by various groups of distribution transformers.

Key words: power transformer diagnostics, distribution transformer, diagnostic methods, on-site testing, transformer maintenance

1. UVOD

Pod pojmom dijagnostike transformatora razumijeva se primjena jedne ili više dijagnostičkih metoda s ciljem određivanja stanja transformatora, odnosno u krajnjem slučaju, određivanja i lociranja kvara transformatora. Dijagnostika transformatora na terenu se razlikuje od tvorničkih ispitivanja u laboratoriju proizvođača transformatora već samim time što je na mjesto ugradnje transformatora moguće dopremiti samo prenosivu ispitnu opremu [1].

Naravno, i "tvornička" i "terenska" ispitivanja imaju svoju zadaću. Temeljem njihove usporedbe provjerava se je li došlo do promjene određenih mjerenih parametara od trenutka kada je transformator proizveden (tj. u ispravnom stanju) do trenutka ispitivanja na terenu [2]. U tom smislu, prema mjestu ispitivanja, dijagnostiku energetskih transformatora možemo podijeliti na:

- a) Ispitivanja na terenu - koja rabe prenosive uređaje za mjerenje električkih, ultrazvučnih i toplinskih veličina.
- b) Ispitivanja u laboratoriju – koja rabe uređaje predviđene za rad u laboratorijskim uvjetima, najčešće su to ispitivanja na uzorcima izolacijskih materijala iz transformatora.

U terenskim uvjetima u pravilu nije moguće osigurati referentne uvjete koji su za laboratorijske uvjete normirani. Zbog toga treba smatrati da su laboratorijska ispitivanja u pravilu točnija i zbog toga se smatraju referentnima. Međutim, utjecaj referentnih uvjeta i mogućih smetnji koje one uzrokuju se u većini slučajeva može kontrolirati posebnom obukom ispitivača i odgovarajućim načinom primjene mjernih metoda prilagođenih terenskim uvjetima. Razvoj dijagnostičkih metoda je intenzivan i u pogledu terenskih i laboratorijskih metoda, [3] i [4], ali je sveprisutno nastojanje ka omogućavanju primjene što većeg broja metoda u terenskim uvjetima.

2. PODJELA DIJAGNOSTIČKIH METODA

Broj dijagnostičkih metoda za određivanje stanja transformatora prilično je velik. Primjena svih poznatih dijagnostičkih metoda na svakom pojedinom distribucijskom transformatoru predstavljala bi izuzetno zahtjevan, skup i vremenski dugotrajan posao, koji u većini slučajeva ne bi bio isplativ.

Zbog toga je uvedena podjela dijagnostičkih metoda u nekoliko razina primjene:

- a) Standardni opseg dijagnostičkih metoda
- b) Prošireni opseg dijagnostičkih metoda
- c) Specijalne dijagnostičke metode

Primjena tako podijeljenih dijagnostičkih metoda je pojednostavljena. Standardni opseg dijagnostike primjenjuje se na sve transformatore. Prošireni opseg se primjenjuje prilikom prvog puštanja u pogon ili u okviru postupka procjene preostalog vijeka trajanja transformatora. Pokaže li se potreba za analizom kvara ili posve specijaliziranim metodama primjenjuje se specijalne dijagnostičke metode.

Razvrstavanje pojedinih dijagnostičkih metoda u grupe na opisani način ipak treba shvatiti uvjetno. Naime, razvojem i pojednostavljenjem dijagnostičke tehnike prisutna je tendencija povećanja standardnog opsega na račun proširenog i specijalnog opsega dijagnostičkih metoda.

Ovakav pristup dijagnostici energetskih transformatora pokazao se ekonomičnim i efikasnim. Transformatori u ispravnom stanju, tj. veći dio instaliranih transformatora, su pod redovitim dijagnostičkim nadzorom, ali trošak njihove dijagnostike nije velik, niti transformator treba dugotrajno isključiti s mreže. Tek ako se stanje transformatora pogorša ili ukoliko nastupi kvar transformatora, primjenjuje se viša razina dijagnostike koja zahtijeva dugotrajnije isključenje transformatora s mreže. Povećani trošak dijagnostike u tom slučaju se opravdava smanjivanjem troškova održavanja i eventualnog popravka transformatora te smanjenjem vjerojatnosti budućeg kvara.

2.1. Standardni opseg dijagnostičkih metoda

Standardni opseg dijagnostičkih ispitivanja primjenjuje se u redovitim vremenskim intervalima tijekom vijeka pouzdanog pogona transformatora. Zadaća takvih ispitivanja je pratiti promjene stanja transformatora od njegova puštanja u pogon do trenutka ispitivanja. Ovim opsegom ispitivanja kontrolira se izolacijski sustav transformatora, provodnici, izolacija jezgre, te spojevi i geometrija namota.

Učestalost primjene standardnog opsega dijagnostičkih metoda ovisi o:

- a) Važnosti i naponskom redu transformatora (veći transformatori i transformatori koji nemaju zamjenu kontroliraju se češće u odnosu na slabije terećene transformatore koji, primjerice, rade u paralelnom radu).

- b) Starosti transformatora (starije transformatore treba češće kontrolirati zbog veće mogućnosti pojave odstupanja odnosno kvara nego kod novijih transformatora).
- c) Internim propisima za održavanje transformatora.

Standardni opseg električkih dijagnostičkih ispitivanja transformatora s uljno-papirnom izolacijom obuhvaća ove metode:

- a) Ispitivanje otpora izolacije namota
- b) Ispitivanje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka izolacije namota
- c) Ispitivanje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka izolacije provodnika koji imaju mjerni priključak ili su prilagođeni za mjerenje
- d) Ispitivanje struja magnetiziranja niskim naponom
- e) Ispitivanje otpora namota (kod transformatora s regulacijom mjeri se i razlika između susjednih položaja regulacije na čitavom rasponu regulacije)
- f) Ispitivanje rasipnog induktiviteta parova namota
- g) Ispitivanje frekvencijskog odziva transformatora (FRA)

Kod suhih transformatora standardni opseg dijagnostičkih ispitivanja ne sadrži mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka izolacije namota, koje se primjenjuje samo u specijalnim slučajevima.

Standardni opseg laboratorijskih dijagnostičkih ispitivanja, za uljne transformatore čija je nazivna snaga veća ili jednaka 8 MVA, sastoji se od:

- a) Kromatografske analize plinova otopljenih u transformatorskom ulju
- b) Fizikalno-kemijske analize transformatorskog ulja

Za transformatore snage manje od 8 MVA pod standardnim opsegom laboratorijskih dijagnostičkih ispitivanja podrazumijeva se kontrola probojnog napona. Unatoč navedenom, može se preporučiti proširenje standardnog opsega laboratorijskih ispitivanja i na kromatografsku analizu za transformatore snage veće od 2,5 MVA.

2.2. Prošireni opseg dijagnostičkih metoda

Prošireni opseg dijagnostičkih metoda primjenjuje se prilikom puštanja u pogon i tijekom eksploatacije transformatora za provjeru preostalog vijeka trajanja, obično za distribucijske transformatore veće važnosti. Ove metode se također mogu primijeniti i na bilo koji drugi transformator u okviru posebnih istraživanja ili utvrđivanja uzroka kvara transformatora.

Prošireni opseg dijagnostičkih ispitivanja kod puštanja u pogon obuhvaća slijedeće metode:

- a) Ispitivanje ovlaženosti izolacije metodom obnovljenog napona (RVM) - električka metoda
- b) Strukturna analiza ulja - laboratorijska metoda

Prošireni opseg dijagnostičkih ispitivanja za analizu preostalog vijeka trajanja transformatora obuhvaća slijedeće metode:

- a) Ispitivanje ovlaženosti izolacije metodom obnovljenog napona (RVM) - električka metoda
- b) Određivanje sadržaja vlage u papiru - laboratorijska metoda
- c) Analiza furana u transformatorskom ulju - laboratorijska metoda
- d) Procjena preostalog vijeka trajanja transformatorskog papira - laboratorijska metoda
- e) Procjena preostalog vijeka trajanja ulja - laboratorijska metoda
- f) Određivanje sadržaja čestica u ulju - laboratorijska metoda

2.3. Specijalne dijagnostičke metode

Specijalne dijagnostičke metode spadaju u najvišu razinu dijagnostike koje osim angažmana skupe dijagnostičke opreme, zahtijevaju i posebno obučene eksperte za ispravnu provedbu mjerenja i tumačenje dobivenih rezultata. Zbog toga se ove metode primjenjuju u pravilu samo na većim distribucijskim jedinicama i u svrhu analize nedostatka/kvara transformatora.

Neke od specijalističkih metoda su:

- a) Ispitivanje ultrazvučne aktivnosti transformatora - električka metoda
- b) Ispitivanje strujne ovisnosti djelatnih otpora regulacijskog transformatora - električka metoda

3. PREGLED DIJAGNOSTIČKIH METODA

U nastavku je dat kratak pregled važnijih dijagnostičkih metoda, njihovih svojstava, postupka primjene i slično.

3.1. Vizualni pregled transformatora

Vizualni pregled transformatora prvi je i neizostavni korak u dijagnostici transformatora. Cilj mu je uočiti nedostatke na transformatoru kao što su: curenje ulja, onečišćenje hladnjaka, oštećenja provodnika, nedostatak ulja u provodnicima ili konzervatoru, oštećenja AKZ, dotrajnost silikagela i slično.

Važnost vizualnog pregleda osobito je naglašena u slučaju nastanka kvara u neposrednoj blizini ili na samom transformatoru (primjerice bliski kratki spoj kojeg je prouzročila mala životinja ili u slučaju rasprsnuća provodnika na transformatoru). Pažljivim vizualnim pregledom transformatora mogu se prikupiti informacije koje pomažu kod definiranja uzroka nastalog kvara. Takve informacije, zajedno s primijenjenim električkim i laboratorijskim ispitivanjima, pomažu pri ocjeni posljedica kvara, stanju transformatora i načinu sanacije kvara te sprječavanju budućih kvarova.

3.2. Električke dijagnostičke metode

3.2.1. Otpor izolacije namota

Ispitivanje otpora izolacije određuje se u kvalitativnom smislu ovlaženost i/ili ostarjelost izolacije među namotima transformatora i izolacije namota prema uzemljenim dijelovima transformatora. Najčešće se koristi U-I mjerna metoda s izvorom istosmjernog napona od 1000V.

Pojedinačno mjerenje traje 10 minuta, a rezultati se očitavaju nakon: 15 s, 30 s, 1 min, 5 min i 10 min. Za ocjenu stanja izolacije transformatora mjerodavna je vrijednost otpora izolacije izmjerena u 10. minuti. Ostala očitavanja daju dodatnu informaciju o stupnju onečišćenosti izolacije.

Temperatura izolacije namota znatno utječe na izmjerenu vrijednost otpora izolacije. Kako bi se mogla uspoređivati mjerenja na raznim temperaturama, te donositi zaključci o stanju izolacije, izmjerene se vrijednosti korigiraju na 20 °C prema (1):

$$R_{i20} = R_{i,\vartheta} \cdot e^{0,06244 \cdot (\vartheta - 20)} \quad (1)$$

gdje je R_{i20} preračunati otpor izolacije, a $R_{i,\vartheta}$ otpor izolacije izmjeren pri temperaturi ϑ .

Temperature se mjere kontaktnim termometrom na kotlu transformatora. Ukupno se mjeri osam temperatura na većim stranama kotla (po dvije temperature gore i dvije dolje, odnosno metar od poklopca i dna kotla). U (1) se uvrštava srednja vrijednost temperature tijekom mjerenja.

Tablica I. sadrži mjerne spojeve u kojima se mjeri otpor izolacije distribucijskog transformatora kako bi se što bolje ocijenilo stanje izolacije.

Tablica I. Mjerni spojevi kod ispitivanja otpora izolacije

Dvonamotni transformator	VN÷NN, VN÷masa, NN÷masa
Tronamotni transformator	VN÷(SN+NN), VN÷masa, NN÷(SN+VN), NN÷masa

3.2.2. Kapacitet i faktor dielektričkih gubitaka izolacije namota

Mjerenjem faktora dielektričkih gubitaka kvalitativno se određuje ovlaženost i/ili ostarjelost izolacije među namotima i izolacije namota prema uzemljenim dijelovima transformatora. Za mjerenje se koristi mostna metoda s naponom do 10 kV. Ispitni napon može biti i niži od 10 kV ukoliko se procijeni da bi to moglo ugroziti izolaciju namota.

Mjerenje kapaciteta namota služi za provjeru geometrije namota i izolacijskog sustava, ali nije toliko razlučivo kao mjerenje rasipnog induktiviteta. Zato se u dijagnostičkom smislu mjerenje kapaciteta namota rabi kao kontrolno mjerenje.

Temperatura izolacije namota znatno utječe na izmjerenu vrijednost faktora dielektričkih gubitaka izolacije. Radi usporedbe dvaju mjerenja pri različitoj temperaturi, izmjerene se vrijednosti korigiraju na

20 °C prema (2):

$$\tan \delta_{20} = \tan \delta_{\vartheta} \cdot e^{-0,0202 \cdot (\vartheta - 20)} \quad (2)$$

gdje je $\tan \delta_{20}$ preračunati faktor dielektričkih gubitaka izolacije namota, a $\tan \delta_{\vartheta}$ faktor dielektričkih gubitaka izmjeren pri temperaturi ϑ .

Temperature se mjere kontaktnim termometrom na kotlu transformatora na način opisan u 3.2.1. Za bolju ocjenu stanja izolacije mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka se ponavlja u nekoliko spojeva ovisno o vrsti transformatora, kako je navedeno u Tablici I.

U dijagnostičkom smislu, mjerenje faktora dielektričkih gubitaka izolacije namota komplementarno je mjerenju otpora izolacije, te se rezultati obaju ovih mjerenja u pravilu tumače zajedno.

3.2.3. Kapacitet i faktor dielektričkih gubitaka izolacije provodnika

Mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka moguće je obaviti na kondenzatorskim provodnicima koji imaju mjerni priključak ili su posebno prilagođeni za mjerenje na način da im je prirubnica izolirana od kotla i uzemljena vanjskim uzemljivačem. Metoda je vrlo osjetljiva i dobro uočava nedostatke izolacijskog sustava provodnika. Nažalost, izmjerene veličine su temperaturno ovisne, a ta ovisnost je prilično složena. Zbog toga dijagnozu stanja treba prepustiti stručnjaku.

Mjerenjem faktora dielektričkih gubitaka određuje se ovlaženost i/ili ostarjelost izolacije provodnika. Za mjerenje se koristi mostna metoda s naponom do 10 kV.

Uz izmjerene veličine treba navesti temperaturu provodnika pri mjerenju. Ona se mjeri kontaktnim termometrom na glavi, prirubnici i površini gornjeg omotača provodnika, a kao mjerodavna se uzima srednja vrijednost.

3.2.4. Mjerenje struja magnetiziranja kod niskog napona

Mjerenje struja magnetiziranja kod niskog napona (3x380 V) služe za provjeru stanja jezgre. U slučaju nastanka kvara, tipa kratko spojenog zavoja, struja magnetiziranja se znatno poveća u odnosu na referentnu vrijednost, a ako je kvar tipa prekida, struja magnetiziranja se znatno smanjuje i postiže praktički vrijednost 0.

Uobičajeno je da se struja magnetiziranja mjeri na svim namotima, a kod namota s regulacijom dovoljno je mjeriti struje u srednjem položaju. Pri tumačenju dobivenih rezultata treba imati u vidu i grupu spoja namota. Temperatura transformatora nema bitnog utjecaja na izmjerene vrijednosti. Remanentna indukcija utječe na vrijednosti struje magnetiziranja što znatno smanjuje dijagnostičku vrijednost ove metode.

3.2.5. Mjerenje otpora namota

Dijagnostička metoda mjerenja otpora namota služi:

- Za provjeru spojeva u namotima koji se tijekom pogona mogu olabaviti ili oštetiti zbog vibracija i pregrijavanja
- Kod transformatora s regulacijom napona – za provjeru spojeva i kontakata regulacijskog namota i regulacijske sklopke/premještača u svim položajima regulacije (pa čak i u onima koji se tijekom pogona rijetko ili nikako ne koriste)

Zbog zahtijevane točnosti mjerenja, za mjerenje otpora namota koristi se U-I metoda, te spoj sa strujnim i naponskim stezaljkama (prikladno za mjerenje malih otpora). Nakon uspostave ravnotežnog stanja očitaju se napon i struja te izračuna otpor namota. Kod transformatora s regulacijom napona se računom određuju otpori namota u svakom položaju regulacije, te razlike između otpora susjednih položaja regulacije koje bi trebale biti gotovo identične na čitavom opsegu regulacije.

Ova metoda ima mogućnost lociranja mjesta kvara, odnosno strujnog puta na kojem se nalazi loš spoj/kontakt.

Rezultati mjerenja otpora namota su temperaturno ovisni, te je radi usporedbe dvaju mjerenja potrebno izmjeriti temperaturu transformatora tijekom mjerenja. Temperature se mjere u skladu s 3.2.1. kontaktnim termometrom na kotlu transformatora.

Radi analize, dobivene rezultate mjerenja treba preračunavati na 20 °C (praktično za mjerenja na

terenu) ili 75 °C (radi usporedbe s tvorničkim mjerenjima) prema (3):

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{k + \vartheta_2}{k + \vartheta_1} \quad (3)$$

gdje su R_1 i R_2 otpori namota pri temperaturama ϑ_1 i ϑ_2 , a k veličina koja za bakar iznosi 235, a za aluminij 225 [1].

3.2.6. Mjerenje rasipnog induktiviteta parova namota

Tijekom pogona transformatora u namotima se javljaju sile čiji iznosi kod nastanka kratkog spoja poprimaju vrijednosti višestruko veće od iznosa sila u normalnom pogonu. Izloženost namota takvim silama može dovesti do mehaničkih deformacija, te do slabljenja mehaničke čvrstoće namota i oštećenja izolacije među zavojima. Ponavljanje kratkih spojeva blizu transformatora djeluje kumulativno, a krajnja posljedica je proboj transformatora.

Rasipni induktivitet namota je parametar osjetljiv na promjenu geometrije namota. Korištenjem Maxwellovog mosta moguće je s visokom točnošću mjeriti rasipne induktivitete između parova namota na istom stupu jezgre. Promjena rasipnog induktiviteta proporcionalna je promjeni geometrije namota. Na osnovi dugogodišnjeg iskustva uspostavljen je odnos između relativne promjene rasipnog induktiviteta (u odnosu na referentno mjerenje ili na mjerenje na drugoj fazi u istom mjernom spoju) i intenziteta deformacije namota, te zbog toga ova metoda ima visoku dijagnostičku vrijednost. Utjecaj temperature namota na rezultate mjerenja je zanemariv. Mjerni spojevi ovise o vrsti transformatora i dati su u Tablici II.

Tablica II. Mjerni spojevi za mjerenje rasipnog induktiviteta parova namota

Vrsta transformatora	Napajan	Kratko spojeni priključci
Dvonamotni ili Tronamotni sa stab. namotom	VN namot	NN namot
Tronamotni s tercijarom	VN namot	SN namota
	VN namot	NN namota
	SN namot	NN namota

Ako spoj transformatora to dozvoljava, preporuča se mjerenje faznih rasipnih induktiviteta. Linijski rasipni induktiviteti imaju manju dijagnostičku vrijednost. Ukoliko se napon priključuje na namot s regulacijom, regulacija mora biti u položaju koji uključuje maksimalan broj zavoja. Mjerenje u ostalim položajima obavlja se prema potrebi. Samo u posebnim slučajevima (npr. pri analizi kvara) preporuča se napajati namot nižeg napona a kratko spajati namot višeg napona.

3.2.7. Mjerenje frekvencijskog odziva transformatora

Mehaničke deformacije u namotu utječu na promjenu krivulja frekvencijskog odziva. Na priključke transformatora primjenjuje se napon promjenjive frekvencije u rasponu od 10^2 do 10^6 Hz. Omjeri primijenjenog napona i odziva na drugom kraju namota, u promatranom rasponu frekvencija, tvore krivulju frekvencijskog odziva.

Promjenom geometrije namota, uslijed mehaničke deformacije, mijenja se i krivulja frekvencijskog odziva namota tako da se mijenjaju rezonantne frekvencije. Te frekvencije se mijenjaju u odnosu na prethodno mjerenje (dio krivulje se „pomiče“ u horizontalnom smjeru) ili se pojavljuju nove rezonantne frekvencije, tj. nastaju novi ekstremi na krivulji. Za kvalitetniju primjenu ove dijagnostičke metode potrebno je imati početno (referentno) mjerenje na istom transformatoru ili na transformatoru iste konstrukcije.

3.2.8. Termovizija

Termovizija je dijagnostička metoda kojom se tijekom pogona, pomoću infracrvene termovizijske kamere određuje temperatura na vizualno dostupnim dijelovima transformatora pri čemu su posebno karakteristični provodnici s pripadajućim spojevima. Termovizija je vrlo pogodna za određivanje

temperaturne razlike između sličnih objekata (primjerice provodnika) te zbog toga ima mogućnost registriranja i lociranja kvara. Ograničena je vidljive dijelove transformatora i praktično neprimjenjiva za određivanje temperature unutar kotla. Zadovoljavajući rezultati postižu se uz uvjet da je teret transformatora veći od 50% nazivne snage.

3.2.9. Mjerenje ovlaženosti izolacije metodom obnovljenog napona (RVM metoda)

Kod mjerenja obnovljenog napona izolacijski sustav transformatora predstavlja dielektrik kondenzatora čija je jedna obloga uzemljena, a druga priključena na istosmjerni napon od 2000 V. Pomoću istosmjernog napona, izolacijski sustav transformatora se polarizira. Nakon toga kondenzator se kratko spaja i izolacija depolarizira. Taj slijed polarizacije i depolarizacije se provodi u različitim, unaprijed određenim, vremenskim intervalima i mjeri se tzv. maksimalni obnovljeni napon nakon svakog polarizacijskog/depolarizacijskog ciklusa. Ciklus, tj. vrijeme polarizacije pri kojemu je izmjeren najveći obnovljeni napon karakterizira ovlaženost izolacijskog sustava. Na osnovu trajanja polarizacije u tom karakterističnom ciklusu i temperature izolacijskog sustava, iz baždarnih se krivulja procjenjuje prosječni sadržaj vlage u izolaciji transformatora. Budući da dijagnostički rezultat ovisi o temperaturi transformatora potrebno je odrediti temperaturu transformatora tijekom mjerenja, kao što je opisano u 3.2.1.

Prednost ove dijagnostičke metode je u tome što nije potrebno vaditi papir iz transformatora da bi se odredila ovlaženost izolacije. Nedostatak mjerenja obnovljenog napona je dugo trajanje mjerenja (ovisno o veličini transformatora i stanju izolacije mjerenje može trajati i preko 12 sati) za vrijeme kojeg transformator nije raspoloživ za pogon.

3.2.10. Mjerenje ultrazvučne aktivnosti

U transformatoru se tijekom njegova vijeka trajanja mogu nastati pojave koje su štetne za izolaciju transformatora, a istovremeno su i izvori ultrazvuka zvuka. To su:

- a) Parcijalna izbijanja
- b) Pregrijavanja pojedinih dijelova transformatora s temperaturama iznad 200 °C

Postavljanjem više ultrazvučnih detektora razmještenih po kotlu transformatora moguće je prikupljati ultrazvučne signale dok je transformator u pogonu. Korištenjem računala dobiveni se signali analiziraju, te je moguće odrediti mjesto u kotlu transformatora koje je izvor ultrazvuka, a samim tim i lokaciju eventualnog kvara.

Pomoću ove metode moguće je locirati izvor parcijalnih izbijanja u transformatoru ili izvor jakog pregrijavanja, a da je pri tome transformator cijelo vrijeme ostane u normalnom pogonu. Lokacija kvarnog mjesta je vrlo bitna u smislu procjene rizika daljnjeg pogona kako bi popravak mogli obaviti u, za sustav, najpogodnije vrijeme. Osim toga, utemeljenu odluku o tome treba li popravak provesti na terenu ili u tvornici moguće je donijeti samo ako poznajemo lokaciju kvarnog mjesta. Saznanja o konstrukcijskim osobitostima transformatora pri tom su bitna.

3.3. Laboratorijske dijagnostičke metode

3.3.1. Kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju

Razgradnja izolacijskih materijala u izolacijskom sustavu ulje-papir odvija se tijekom pogona transformatora na dva načina:

- a) Postupno – kod normalnog starenja u unaprijed predviđenim pogonskim uvjetima
- b) Naglo – u slučaju nepredviđenih, povećanih električkih i termičkih naprezanja.

Tijekom pogona u transformatoru se javljaju plinovi koji se više ili manje otapaju u ulju. Specifičnim analitičkim postupcima, odnosno kromatografskom analizom, utvrđuje se postojanje i količina plinova otopljenih u ulju. Dijagnostički bitni plinovi koje možemo detektirati u izolacijskom ulju su:

- a) kisik, dušik i ugljični dioksid – posljedica su doticaja sa zrakom iz atmosfere
- b) vodik, metan, etilen, etan i acetilen – posljedica su degradacije ulja
- c) ugljični monoksid i ugljični dioksid – posljedica su degradacije papira

Kromatografska analiza plinova je provjerena, ali vrlo složena dijagnostička metoda s različitim pristupima pri tumačenju dobivenih rezultata i to se preporuča prepustiti specijalisti. Ona pouzdano otkriva povećana električka i termička naprezanja u izolacijskom sustavu uljnih transformatora i najbolja je smjernica za primjenu drugih dijagnostičkih metoda kojima se može dodatno pojasniti narav tih povećanih

naprezanja. Otkrivanje lokacije kvara pomoću kromatografske analize plinova nije moguće.

Metoda se, uz izvjesna ograničenja, može primijeniti bez obzira da li je transformator u pogonu ili ne, u povremenoj primjeni (laboratorijsko ispitivanje) ili kontinuirano tijekom pogona (motrenje).

Nedostatak metode je u činjenici da su rezultati osjetljivi na kvalitetu uzorkovanja ulja (reprezentantnost uzorka, utjecaj okoline, itd.). Postupak i oprema za uzimanje uzoraka ulja određeni su normom [5]. Preporuča se uzimati uzorak ulja iz donje razine kotla, što je najčešće moguće i tijekom pogona transformatora, ali uvijek uvažavajući sigurnosne razloge. U slučaju naglog kvara transformatora potrebno je pričekati s uzimanjem uzoraka ulja nekoliko sati od nastanka kvara kako bi se nastali plinovi otopili u ulju i raspodijelili po njegovom obuhvatnom prostoru. U slučaju izdvajanja plina u Buchholz releju, pored uzorka ulja iz kotla, poželjno je uzeti uzorak plina i ulja iz njega.

3.3.2. Fizikalna i kemijska analiza transformatorskog ulja

Fizikalna i kemijska svojstva transformatorskog ulja pokazuju njegovu kvalitetu i stanje s aspekta dielektričkih svojstava, onečišćenosti i njegove ostarjelosti. Postupak uzimanja uzoraka može imati znatan utjecaj na rezultate ispitivanja te je s tim u svezi bitno pridržavati se naputaka u normi [5].

Fizikalno-kemijska analiza transformatorskog ulja obuhvaća slijedeća svojstva:

- a) Izgled ulja (boja i čistoća)
- b) Probojni napon
- c) Sadržaj vode u ulju
- d) Sadržaj taloga u ulju
- e) Inhibitor u ulju
- f) Neutralizacijski broj
- g) Otpor izolacije i faktor dielektričkih gubitaka ulja
- h) Površinska napetost ulja

Određivanje fizikalnih i kemijskih svojstava ulja spada u standardni opseg laboratorijskih ispitivanja. Ispitivanja probojnog napona ulja provode se i u okviru planskog održavanja transformatora.

3.3.3. Strukturna analiza ulja

Strukturna analiza transformatorskog ulja služi za identifikaciju ulja prema njegovoj strukturi. Metodom infracrvene spektrofotometrije dobivaju se karakteristične složene krivulje koje predstavljaju tzv. „otisak prsta“ ispitivanog ulja. Kod ulja u eksploataciji strukturna analiza ulja se koristi za određivanje sadržaja inhibitora oksidacije i prisutnosti kemijskih onečišćenja stranog porijekla ili produkata degradacije.

3.3.4. Određivanje sadržaja vlage u papiru

Sadržaj vlage u papiru praktično je jednak sadržaju vlage u izolacijskom sustavu transformatora (99% vlage nalazi se u papiru). Za određivanje vlage u uzorku papira koristi se metoda Karl Fisherove kulonometrijske titracije. Izravno mjerenje daje točnije rezultate od vrijednosti vlage u papiru dobivene preračunavanjem (pomoću ravnotežnih krivulja ulje-papir) iz vlage u transformatorskom ulju. Uzimanje uzorka papira iz transformatora i njegov transport u laboratorij je zahtijevan postupak, te se preporuča da ga nadzire za to obučen stručnjak.

3.3.5. Analiza furana u transformatorskom ulju

Starenjem papirno-uljne izolacije transformatora razgrađuje se celuloza koja je glavni sastojak transformatorskog papira [6], a posljedica je stvaranje specifičnih spojeva – furana (furfuraldehida). Visokoučinska tekućinska kromatografija (HPLC) omogućuje procjenu stanja papira na temelju produkata razgradnje papira, furana, otopljenih u transformatorskom ulju. Za određivanje stupnja degradacije, odnosno ostarjelosti papira, koristi se 2-furfural (2FAL), jedan od pet karakterističnih derivata.

Korištenjem ove metode izbjegava se zahtijevan postupak uzimanja uzorka papira i njegov transport do laboratorija. Uzorak transformatorskog ulja uzima se na isti način kao za kromatografsku analizu plinova otopljenih u ulju.

3.3.6. Određivanje vijeka trajanja transformatorskog papira – stupanj polimerizacije papira (DP)

Transformatorski papir je praktično neizmjenjiv dio transformatora. Zbog toga je starenjem papira dominantno određeno starenje izolacijskog sustava transformatora. Starenjem papira slabe i njegova mehanička svojstva, što ima za posljedicu slabljenje otpornost transformatora na kratki spoj. Mehanička svojstva papira su u izravno povezana sa stupnjem polimerizacije.

Mjerenjem stupnja polimerizacije papira moguće je procijeniti njegov preostali vijek. Mjerodavniji uzorak transformatorskog papira je onaj uzet s namota transformatora i to njegovih gornjih dijelova ali je do njih u terenskim uvjetima praktički nemoguće doći. Za dijagnostičke svrhe se često koriste uzorci papira uzeti na terenu sa strujom protjecanih izvoda namota. Na temelju njihovog stupnja polimerizacije moguće je procijeniti ostarjelost papira s namota. Treba uzeti barem dva uzorka po transformatoru, po mogućnosti s različitih mjesta. Odabir mjesta uzimanja uzorka, samo uzimanje uzoraka i njihov transport u laboratorij je specifičan postupak koji se treba obaviti uz nadzor za to obučenog stručnjaka.

3.3.7. Određivanje preostalog vijeka trajanja transformatorskog ulja

Određivanje preostalog vijeka transformatorskog ulja je skup dijagnostičkih metoda koje se temelje na usporedbi fizikalnih i kemijskih svojstava ulja prije i nakon starenja. Pokus ubrzanog starenja se provodi u laboratoriju, na uzorcima ulja u dostavnom stanju i uz dodatak inhibitora oksidacije.

Ova dijagnostička metoda predstavlja vrlo važan izvor izravnih podataka neophodnih za procjenu preostalog vijeka trajanja transformatorskog ulja. Dobivenim rezultatima određuje se neophodnost zamjene ili se preporuča najbolji mogući način regeneracije ulja.

3.3.8. Utvrđivanje sadržaja čestica u ulju

Čestice u transformatorskom ulju smanjuju izolacijsko svojstvo ulja, bez obzira jesu li one vodljive ili nevodljive, posebice ako je u ulju prisutna i voda. Tijekom pogona, na vrlo visokim temperaturama, u ulju se izdvajaju čestice grafita koje mogu biti uzrokom proboja izolacije na mjestima jakog električnog polja i nekoliko godina poslije njihova nastanka. Osim toga, čestice u ulju mogu biti posljedica intenzivne korozije, habanja metala i papira i slično.

4. PRIJEDLOG OPSEGA I UČESTALOSTI PRIMJENE DIJAGNOSTIKE

Prijedlog dijagnostičkih ispitivanja i učestalost primjene standardnog opsega dijagnostike na pojedine grupe distribucijskih transformatora dat je u Tablici III.

Opseg i učestalost primjene dijagnostike usko je povezana s važnošću, stanjem i starošću transformatora. Podaci u Tablici III. odnose se na prosječne transformatore, gdje se pod pojmom prosječan podrazumijeva transformator:

- a) od kojeg se zahtijeva uobičajena pogonska sigurnost,
- b) koji nije stariji od 20 godina,
- c) koji nema preporuku pojačanog dijagnostičkog nadzora zbog nedostataka (primjerice oslabljene izolacije, povećanog rasipnog induktiviteta i slično).

Svaki transformator s obzirom na njegove i pogonske specifičnosti može imati vlastiti režim dijagnostike koji može biti stroži od navedenog u Tablici III.

Prošireni opseg dijagnostičkih ispitivanja primjenjuje se kad a rezultati standardnog opsega ispitivanja na to ukažu, odnosno kada se želi ustanoviti preostali vijek trajanja transformatora, što se preporuča nakon 20 godina pogona uz prosječne uvjete. Na ovaj način dobit će se pravodobne informacije za planiranje eventualne obnove transformatora, nabavku novih zamjenskih transformatora i sl.

Specijalna dijagnostička ispitivanja se poduzimaju kada na njihovu potrebu ukažu rezultati standardnog i/ili proširenog opsega ispitivanja, odnosno u specifičnim uvjetima kada se želi pojasniti posve određen problem.

Tablica III. Prijedlog standardnog opsega dijagnostike distribucijskih transformatora

DIJAGNOSTIKA	Uljni transformatori < 2,5 MVA		Uljni transformatori 2,5 - 8 MVA		Uljni transformatori ≥ 8 MVA		Suhi transformatori	
	Primjena	Učestalost	Primjena	Učestalost	Primjena	Učestalost	Primjena	Učestalost
Vizualni pregled	DA	1G	DA	6M	DA	6M	DA	1G
Termovizijski pregled	DA	1G	DA	1G	DA	1G	DA	1G
Probojni napon	DA	2G	DA	2G	DA	2G		
Kromatografska analiza plinova iz ulja	prema potrebi		DA	5G	DA	2G (110 kV) 5G (ostali)		
Fizikalno kemijska analiza ulja	prema potrebi		prema potrebi		DA	3G (110 kV) 5G (ostali)		
Električka ispitivanja	prema potrebi		DA	5G	DA	5G	DA	4-6G

5. ZAKLJUČAK

Za ocjenu stanja distribucijskih transformatora rabe se brojne električke i laboratorijske dijagnostičke metode. Primjena svih poznatih dijagnostičkih metoda na svakom pojedinom distribucijskom transformatoru predstavljala bi izuzetno zahtjevan, skup i vremenski dugotrajan posao, koji u većini slučajeva ne bi bio isplativ. Zbog toga su dijagnostičke metode podijeljene na tri razine primjene: standardni opseg, prošireni opseg i specijalne dijagnostičke metode. Standardni opseg dijagnostike primjenjuje se na sve transformatore. Prošireni opseg se primjenjuje prilikom prvog puštanja u pogon ili u okviru postupka procjene preostalog vijeka trajanja transformatora. Pokaže li se potreba za analizom kvara ili posve specijaliziranim metodama primjenjuju se specijalne dijagnostičke metode. Pravilnim tumačenjem rezultata dobivenih dijagnostičkim metodama ocjenjuje se stanje transformatora i na taj način poboljšava njegova pouzdanost pogona i smanjuju troškovi održavanja te eventualnog popravka.

U radu su ukratko opisana svojstva dijagnostičkih metoda, njihove temeljne mogućnosti detekcije i lokacije problema te ograničenja, a predložen je opseg i učestalost primjene dijagnostike na distribucijskim transformatorima.

LITERATURA

- [1] IEC 60076-1 Power Transformers - Part 1: General, 1993.
- [2] A. Carlson, J. Fuhr, G. Schemel, F. Wegscheider: Testing of Power Transformers, ABB, Zurich, 2003.
- [3] A. Mikulecky, Z. Godec, S. Čabrac S.: Prijedlog preporuka za redovito održavanje energetskih transformatora nazivnih snaga većih od 5 MVA, Končar – IET, Zagreb, 1993.
- [4] Service Handbook for Transformers, ABB, Zurich, 2007.
- [5] IEC 60475/1 Method of sampling liquid dielectrics, 1974.
- [6] Horning M., Kelly J., Myers S., Stebbins R.: Transformer Maintenance Guide, TMI, USA, 2004.