



Antun Mikulecky, dipl.ing.  
Nikola Knez, ing.  
Končar - Institut za elektrotehniku, Zagreb

12-03

## DIJAGNOSTIKA I MONITORING ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

### SAŽETAK

Analizirani su dijagnostički rezultati električkih metoda u standardnoj primjeni u terenskim uvjetima. Ti rezultati mogu poslužiti za analize kvarova i unapređenje tehničkih rješenja transformatora te postrojenja. Ujedno oni mogu poslužiti kao polazište za odabir odgovarajućeg sustava motrenja (on line monitoring).

Ključne riječi: energetski transformator, dijagnostika, monitoring

## POWER TRANSFORMERS DIAGNOSTIC AND MONITORING

### ABSTRACT

Diagnostic results of electrical measuring methods that are normally used on site are analyzed. These results can be used in fault analysis and for improvement of transformer and substation design. They can also be used as introductory stage in selection of the most appropriate on-line monitoring system.

Key words: Power transformer, diagnostic, monitoring

### 1. UVOD

Dijagnostika energetskih transformatora je periodičko ili pravovremeno određivanje stanja transformatora. Njene sastavnice su mjerne metode i procedure te ekspertna znanja, [ 1, 2] . Motrenje energetskih transformatora je automatizirano i kontinuirano određivanje stanja transformatora, [ 3] . Sastavnice sustava motrenja su podsustavi motrenja određenih parametara transformatora i ekspertni sustav za obradu podataka i pomoć pri donošenju odluke.

Ciljevi dijagnostike i motrenja su identični: povećanje ekonomičnosti pogona i raspoloživosti transformatora. Dakle, može se reći da je automatizirana dijagnostika "bez vremenskog zatezanja" u stvari sinonim za sustav motrenja. Sustavi motrenja energetskih transformatora su u fazi intenzivnog razvoja. Pri tome je bitno u njih ugraditi specifičnosti transformatora i elektroenergetskog sustava te dosadašnja iskustva s dijagnostikom, kvarovima i slično. Zbog značajnih različitosti u svjetskoj praksi, iskustva na ovom području nisu lako i jednostavno prenosiva.

U hrvatskom elektroenergetskom sustavu se na energetskim transformatorima već niz godina primjenjuje standardan opseg dijagnostičkih metoda. On se sastoji od električkih metoda, ispitivanja ulja (posebice kromatografska analiza plinova iz ulja i fizikalno-kemijska analiza ulja) i termovizijskog ispitivanja transformatora (zajedno s cijelim postrojenjem).

Prisutan je trend proširenja standardno primjenjivanih dijagnostičkih metoda novim metodama (visokoučinska tekućinska kromatografija ulja, procjena preostalog vijeka trajanja papira i ulja, polarizacijski spektar izolacije - RVM, ultrazvučne i električke metode mjerenja i lokacije parcijalnih izbijanja, razne vrste odziva transformatora, itd.). Primjena mikroprocesorske tehnike tome daje dodatan i snažan impuls.

Električka mjerenja se provode približno nakon svake 2. do 6. godine, ovisno o vrsti transformatora, zahtjevima za raspoloživost transformatora i starosti transformatora, ali i izloženosti "stresnim situacijama" (kratki spojevi, preopterećenja, popravci na terenu i slično). Mjerenja se provode u terenskim uvjetima, a sastoje se od sljedećih mjernih metoda:

1. Otpor izolacije transformatora,
2. Faktor dielektričkih gubitaka izolacije transformatora,
3. Faktor dielektričkih gubitaka provodnih izolatora koji imaju mjerni priključak,
4. Struje magnetiziranja pri niskom naponu,
5. Otpori namota u svim položajima regulacijske preklopke, i
6. Rasipni induktiviteti transformatora.

Detaljne opise navedenih dijagnostičkih metoda i kriterija moguće je naći u [ 1, 2] . Rezultati dijagnostičkih ispitivanja unose se u odgovarajuće baze podataka.

## 2. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA ELEKTRIČKIM METODAMA

U razdoblju od 1994. do 1998. ispitali smo na terenu 362 energetska transformatora pojedinačne snage veće od uključivo 8 MVA. Sva ispitivanja su provedena prema određenoj proceduri, s iskusnim ispitivačima, te provjerenim i održavanim instrumentima. Dijagnozu na temelju rezultata ispitivanja donosili su za to posebno ovlaštene eksperti.

U ovoj analizi su razmatrane sve dijagnoze koje su imale karakter naznake potencijalnog kvara i u kojima se ukazivala potreba za intervencijom. Kao kriteriji kada pojedina metoda nedvojbeno ukazuje na potencijalni kvar transformatora uzeti su kriteriji prema [ 2] za sve metode kod kojih je on izričito naveden. U ostalim slučajevima odabran je kriterij na temelju dugogodišnjeg iskustva. Ukratko, kriteriji su sljedeći:

1. Otpor izolacije ( $R_{iz}$ ) odgovarajuće mjerne kombinacije, preračunat na 20 °C, je manji ili jednak vrijednostima iz [ 2] .
2. Faktor dielektričkih gubitaka ( $\tan\delta$ ) odgovarajuće mjerne kombinacije, preračunat na 20 °C, je veći ili jednak vrijednostima iz [ 2] .
3. Faktor dielektričkih gubitaka provodnih izolatora ( $PI \cdot \tan\delta$ )  $\geq 1\%$ .
4. Struja magnetiziranja ( $I_0$ ) je veća od deseterostruke vrijednosti referentnog mjerenja.
5. Otpor namota ( $R_n$ ): ako je međufazna asimetrija  $\geq 5\%$ .
6. Rasipni induktivitet namota transformatora ( $L_x$ ): ako je međufazna asimetrija  $\geq 5\%$ .

Broj naznaka potencijalnih kvarova za primjenjivane električke metode i u skladu s gornjim kriterijima je u tablici 1.

Ispravnost gornjih kriterija je u praksi dokazana:

1. i 2. Loši rezultati  $R_{iz}$  i  $\tan\delta$  su redovito praćeni nedozvoljeno visokim sadržajem vlage u ulju i papiru i niskom probojnom čvrstoćom ulja.

3. Poznati su slučajevi rasprsnuća provodnih izolatora kod kojih je u prethodnom mjerenju izmjeren  $\tan\delta > 1\%$ . Takođe je poznat slučaj provodnog izolatora na kome je izmjeren  $\tan\delta > 1\%$  nakon čega je izolator pravovremeno zamjenjen rezervnim. Kada se s ciljem defektaže pristupilo pregledu izolatora, ustanovljen je nadpritisak u izolatoru i tragovi gareži u ulju.

4. Mjerenjem struja magnetiziranja kod niskog napona moguće je otkriti grube nedostatke na jezgri i to tipa kratkospojenog zavoja. Manje nedostatke jezgre ovom metodom nije moguće otkriti zbog velikih rasipanja rezultata mjerenja [ 2] .

5. U slučaju odstupanja otpora namota gotovo isključivo se radi o povećanim kontaktnim otporima (priključci, regulacijske preklopke i premještači). Ako su kontakti u glavnom ulju često postoji korelacija sa

rezultatima kromatografske analize. Korelacija sa termovizijom često postoji kod vizualno dostupnih kontakata. Promjene otpora koje ukazuju na teretni dio sklopke obično nestaju nakon revizije.

6. Poznato nam je sedam slučajeva popravka transformatora zbog odstupanja  $L_x$  za više od 5 %. U svim slučajevima dijagnosticirane su značajne deformacije na namotima i/ili prigušnicama [ 4, 5] . Poznato je i nekoliko slučajeva kada su transformatori s dijagnosticiranom asimetrijom  $L_x$  ostali u pogonu i nedugo zatim doživjeli havariju zbog kratkog spoja u mreži.

Tablica I. Broj naznaka potencijalnih kvarova transformatora po dijagnostičkim metodama

	$R_{iz}$	$\tan\delta$	$PI.\tan\delta$	$I_0$	$R_n$	$L_x$	Ukupno	Uk. br. mj.
Broj naznaka	5	4	10	0	25	18	62	362
Naznake u %	8	6	16	0	41	29	100	

Broj transformatora s naznačenim potencijalnim kvarom je manji od 62 zbog toga što je u nekoliko slučajeva više od jedne metode ukazivalo na potencijalni kvar. Tako se na primjer, loši rezultati otpora izolacije i loš  $\tan\delta$  izolacije transformatora najčešće javljaju istovremeno.

S obzirom da se za naše prilike radi o relativno velikom broju ispitivanja, može se smatrati da dotični ispitivani uzorak (362 mjerenja) dobro reprezentira našu populaciju transformatora nazivnih snaga većih od 8 MVA. Rezultati iz tablice I mogu se tumačiti na više načina.

Najveći broj naznaka potencijalnih kvarova ima metoda mjerenja otpora namota, oko 41 % ukupnog broja naznaka. Mjesto nastanka promjene otpora je najčešće bilo na regulacijskim preklopkama i premještačima te na spojevima izvoda na provodne izolatore. U velikoj većini slučajeva problem je saniran na terenu, uz relativno kratku obustavu pogona (od jedan pa do nekoliko dana).

Metoda mjerenja rasipnog induktiviteta indicirala je potencijalni kvar u 29 % ukupnog broja naznaka. Mjesto nastanka promjene  $L_x$  su najčešće bili dinamičkim silama u kratkom spoju deformirani sredjenaponski i niženaponski namoti (tercijari), te prigušnice za ograničenje struje kratkog spoja. Koliko nam je poznato, u promatranom razdoblju niti jedan slučaj iz ove grupe nije saniran na terenu. Zastoji pogona transformatora su trajali od jedan do nekoliko mjeseci. Kako bi se smanjio broj ovih skupih kvarova, provedeni su, ili se upravo provode zahvati u smislu poboljšanja otpornosti transformatora na kratki spoj (novih transformatora ali i starih - tijekom popravka) i smanjenja broja kratkih spojeva primjenom zaštite transformatora od malih životinja (ili bolje rečeno - zaštitom malih životinja od transformatora).

Metoda mjerenja faktora dielektričkih gubitaka provodnih izolatora ( $PI.\tan\delta$ ) naznačila je potencijalni kvar na oko 16 % ukupnog broja naznaka. Provodni izolatori su bili na terenu zamjenjeni rezervnima, ili su postavljeni na poziciju nultočke, ako rezerve nije bilo. Zastoj pogona trajao je kratko (obično jedan dan). Međutim, vezano za provodne izolatore i predmetnu dijagnostičku metodu, treba navesti da je u promatranom razdoblju inicirana zamjena još 15 provodnih izolatora zbog porasta  $\tan\delta$  i prekoračenja granice od 0,7 %. Dakle broj iniciranih zamjena iznosi 25 što je jednako broju naznaka zbog promjene otpora. Relativno često "kvarenje" provodnih izolatora nagnalo nas je na istraživanja kako bi se tome otkrio uzrok. Istraživanja kvarova energetskih transformatora zbog rasprsnuća provodnih izolatora i potencijalnih kvarova provodnih izolatora (pravodobno spriječenih dijagnostičkim ispitivanjima) ukazuju da je ta pojava vrlo vjerojatno u vezi sa izvedbom priključka na provodne izolatore pomoću cijevnih sabirnica. Naime, tijekom zadnjih nekoliko godina uočili smo da je velika većina problematičnih provodnih izolatora bila prikjučena preko cijevnih sabirnica, te da provodni izolator na kraju cijevne sabirnice, osim svoje osnovne zadaće, služi i kao potporni izolator. Mehanizam "kvarenja" provodnih izolatora nije još u potpunosti jasan, ali se uočava da je on najvjerojatnije mehaničke naravi. Smatramo da djelovanje sila na provodni izolator zbog nošenja cijevne sabirnice može tijekom dugotrajnog pogona oštetiti njegov izolacijski sustav. Detaljnija analiza ovog problema je u tijeku.

Otpor izolacije  $R_{iz}$  i  $\tan\delta$  izolacije transformatora inicirali su potencijalni kvar u 8 odnosno 6 % slučajeva pri čemu se indikacije u većini slučajeva javljaju istovremeno. Ovdje se najčešće radi o starim transformatorima s visokim sadržajem vlage u papiru i ulju, te vjerojatno pri kraju svog vijeka trajanja.

Zanimljivo je usporediti gornje rezultate sa sličnima u svijetu ali nismo mogli doći do odgovarajućih podataka. Za barem orijentacijsku usporedbu može poslužiti analiza kvarova energetskih transformatora prema [ 6] . Relativan udio kvarova na pojedinim dijelovima transformatora u odnosu na ukupan broj kvarova svih obrađenih transformatora je u tablici II.

Tablica II. Relativan udio kvarova po dijelovima transformatora u %

Dio transformatora	Udio u kvarovima, %
Namoti	23
Jezgra	3
Provodni izolatori	16
Kotao i ulje	14
Regulacijska preklopka	31
Ostala oprema	13

Unatoč tome što uspoređujemo naznake mogućih kvarova (tablica I) sa kvarovima koji su se dogodili (tablica II) i razlikama u sistematizaciji i prezentaciji podataka, podudarnost udjela naznaka potencijalnih kvarova po dijagnostičkim metodama i stvarnih kvarova se čini očitom. Metoda mjerenja rasipnog induktiviteta ukazuje na potencijalne kvarove namota, struja magnetiziranja na kvarove jezgri, otpori namota na kvarove kontaktnih mjesta (regulacijske preklopke, premještači a dijelom i provodni izolatori), a mjerenje tanđ provodnih izolatora neposredno ukazuje na potencijalne kvarove visokonaponskih provodnih izolatora.

### 3. MOTRENJE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Zadaća sustava motrenja transformatora je smanjenje troškova pogona i povećanje raspoloživosti objekta. Da bi on tu svoju zadaću mogao izvršiti na zadovoljavajući način, sustav motrenja treba obrađivati odgovarajući broj mjernih veličina koji dovoljno dobro opisuju stanje transformatora. Treba biti razumne cijene, pouzdan, otporan na smetnje i fleksibilan (mora postojati jednostavna mogućnost nadogradnje). Vijek trajanja transformatora je oko 30 godina i treba težiti sličnom vijeku trajanja sastavnica sustava motrenja (osjetnici, hardware, software). Takođe je bitna mogućnost montaže na terenu, na već postojeći transformator. Stupanj složenosti i cijena postupka ugradnje pojedinih osjetnika značajno ovise o konkretnom slučaju. Neke od njih je moguće ugraditi samo tijekom proizvodnje transformatora (npr. osjetnik temperaturnog profila namota, osjetnik montažne sile namota). Zbog toga treba očekivati razlike između sustava motrenja za novi transformator i već postojeću jedinicu.

Posebno je zanimljiv problem izbor statusa sustava motrenja transformatora, tj. da li sustavu motrenja dopustiti izvršne naredbe (npr. smanjenje tereta, isključenje i slično), ili ne. Za sada se smatra da sustav motrenja treba imati ulogu ranog upozorenja u smislu savjeta pri donošenju odluke. Pojedine sastavnice sustava mogu imati i izvršnu ulogu (npr. digitalna termoslika). Zaštita transformatora funkcionira i nadalje na uobičajen način, a informacije o njenom djelovanju se koriste u sustavu motrenja.

Sustav motrenja treba biti prilagođen našoj populaciji transformatora u smislu tehničkih specifičnosti transformatora i sustava. S obzirom da je dijagnostika transformatora relativno dobro razvijena, smatramo logičnim iskoristiti stečena iskustva pri kreiranju sustava motrenja transformatora. U skladu s tim, te tablicama I i II, može se predložiti sustav motrenja transformatora sastavljen od slijedećih podsustava motrenja mjernih veličina: plinova iz transformatora, provodnih izolatora, regulacijske sklopke, namota, starenja izolacije i motrenja općih veličina i stanja transformatora.

#### 3.1 Podsustav motrenja plinova iz transformatora.

Analizom plinova iz ulja (otopljenih u ulju) registrira se postojanje i trend prekomjernih električkih i/ili termičkih naprezanja u ulju koje se motri [ 7] . Ovi podaci mogu biti nadopunjeni digitalnim Buchholz relejem koji ima mogućnost mjerenja brzine razvijanja izdvojenih plinova [ 8] . Ovako koncipiranim podsustavom motrenja plinova iz ulja moguće je postići dobru osjetljivost u vrlo širokom rasponu brzina generiranja plinova. Lokacija mjesta izvora plinova općenito nije moguća. Ovaj podsustav motrenja je osjetljiv u detekciji povećanih električkih i/ili termičkih naprezanja ali samo za uljni sustav u koji je ugrađen. Naime, transformator može imati više uljnih sustava (ulje aktivnog dijela, teretnog dijela regulacijske preklopke i provodnih izolatora) od kojih neki mogu biti više ili manje povezani u smislu razmjene plinova i ulja [ 2] . Postoje relativno dobra iskustva s podsustavima motrenja plinova iz ulja. Montaža na terenu ne predstavlja veći problem.

### 3.2 Podsustav motrenja provodnih izolatora

Visokonaponski provodni izolatori (osim tehničkih rješenja starih tridesetak i više godina) imaju vlastito ulje koje se ne miješa s glavnim uljem transformatora. Zbog toga motrenje plinova iz glavnog ulja transformatora ne kazuje ništa o eventualnim električkim izbijanjima u provodnom izolatoru. Veličine koje ukazuju na stanje provodnog izolatora su tanđ, kapacitet, iznos parcijalnih izbijanja, pritisak ulja u provodniku i slično. Primjer jednog od mogućeg načina motrenja provodnog izolatora je naveden u [ 9] . Broj provodnih izolatora koje treba motriti može biti i veći od 10 po transformatoru. Iskustva sa sličnim podsustavima motrenja su skromna. Montaža na terenu ne bi trebala predstavljati veći problem.

### 3.3 Podsustav motrenja regulacijske sklopke

Zbog relativno velikog udjela kvarova na regulacijskim preklopkama i premještačima, oni moraju biti nadzirani. Regulacijske sklopke su veoma složeni mehanizmi. U osnovi se sastoje od mehaničko-pogonskog dijela, upravljanja, dijela u vlastitom ulju (teretni dio) i dijela u glavnom ulju (birači, predbirači i slično). Podsustav motrenja se temelji na metodama mjerenja plinova iz ulja, analizi akustičkog signala i mehaničkog momenta pogonskog mehanizma [ 10] . Za sada je još teško ocijeniti efikasnost dotičnog podsustava.

### 3.4 Podsustav motrenja namota

Prema našem iskustvu najčešći kvarovi na namotima su zbog deformacija izazvanih silama u kratkom spoju a rjeđe zbog naponskih i lokalnih termičkih problema. Zbog toga smatramo da je dominantna zadaća ovog podsustava motrenje mehaničkih deformacija namota (postojanje naponskih i termičkih problema registrirat će podsustav motrenja plinova). Treba imati u vidu da zbog toga što otpornost namota da podnese dinamičke sile u kratkom spoju opada sa starenjem izolacijskog sustava i izraženog kumulativnog djelovanja sila zbog kratkih spojeva tijekom pogona [ 11 i 12] , ovaj podsustav je posebno zanimljiv za transformatore koji su već u pogonu. Razvoj podsustava motrenja pomaka namota je u istraživačkoj fazi i temelji se na analizi raznih vrsta odziva i prijenosnih funkcija transformatora pri čemu se kao pobuda koristi npr. sklopni prenapon nastao prilikom manipulacije u mreži. Dodatna informacija o ovom problemu može se dobiti iz kontinuiranog mjerenja montažne sile namota. Iskustva sa sličnim podsustavima motrenja su vrlo skromna i njihova efikasnost se za sada ne može ocijeniti. Za ugradnju ovog podsustava motrenja transformator je potrebno djelomično rastaviti.

### 3.5 Podsustav motrenja starenja izolacije

Starenje izolacijskog sustava ulje-papir u realnim uvjetima pogona je složen proces međudjelovanja temperature, vlage i kisika te ugrađenih materijala, tehnologije proizvodnje i uvjeta pogona. Prihvatljiv model starenja izolacije još uvijek je u fazi istraživanja [ 13] . Može se ocijeniti da će se ovaj podsustav sastojati od motrenja i obrade niza veličina kao što su temperatura (npr digitalnom termoslikom), vlage, kisika i pojedinih veličina iz drugih podsustava motrenja. Zbog složenosti ovog podsustava on se vjerojatno neće moći uspostaviti odjednom niti u kratkom roku. Zato ovaj podsustav treba početi graditi primjenom digitalne termoslike zbog njene višeznačne uloge (mjerenje, simulacija, upravljanje i zaštita). Prema našim saznanjima, za sada ne postoje instrumenti za kontinuirano mjerenje sadržaja furana u ulju i stupnja polimerizacije papira s namota transformatora tijekom pogona, te se ove metode još uvijek ne mogu koristiti u sustavu motrenja.

### 3.6 Podsustav motrenja općenitih veličina i stanja transformatora

Ovaj podsustav u načelu nema posebnih osjetnika. On motri veličine koje u različitom obliku već i sada postoje. Motre se naponi, struje te podaci radnog stanja opreme i zaštite (ventili, pokazivači protoka, ventilatori, Buchholz, odušnik, sekundarne zaštite itd...).

#### 4. ZAKLJUČAK

Razvoj elektroenergetskog sustava nalaže stalnu potrebu za smanjenjem troškova pogona i povećanjem raspoloživosti transformatora. Jedan od načina ostvarenja tog cilja prepoznat je u primjeni dijagnostike, a od nedavno i u primjeni sustava motrenja (on-line monitoring). Izbor i uvođenje sustava motrenja transformatora je opsežan i raznorodan zadatak za koji je neophodno formirati odgovarajući stručni tim. Mišljenja smo da izboru i primjeni pojedinih podsustava treba pristupiti odmah zbog stjecanja neophodnih iskustava u njihovoj primjeni. Pri izboru sustava motrenja od velike koristi mogu biti saznanja stečena višegodišnjim istraživanjima, razvojem i primjenom dijagnostičkih metoda na terenu i u laboratoriju.

#### LITERATURA

- [1] Mikulecky, A., Čabrac, S.: Održavanje energetskih transformatora, Energija, 40(1991)6,389-397
- [2] Mikulecky, A., Godec, Z., Čabrac, S.,: Prijedlog preporuka za redovito održavanje energetskih transformatora nazivnih snaga većih od 5 MVA, Končar - IET, 1993.
- [3] Godec, Z.: Mikroprocesorsko motrenje i zaštita energetskih transformatora, Zbornik IV. Savjetovanja HK CIGRE, 1999, R.12.03.
- [4] Šomođi, P.: Kontrola deformacije namota transformatora, Zbornik I. Savjetovanja HK CIGRE, 1993, R.12.03
- [5] Jaman, N. i ostali: Otkrivanje deformacije namota energetskog transformatora ispitivanjem na terenu i njegov popravak, Zbornik II. Savjetovanja HK CIGRE, 1995, R.12.03
- [6] An international survey on failures in large power transformers in service, Electra, 88, May 1983, 21-48.
- [7] Gervais, P., Aubin, J.: On-line monitoring of key fault gases in power transformers and shunt reactors, 1995, Doble Engineering Company
- [8] Elektronishes Buchholzrelais, Februar 1998., Mesko, Albert Hauser GmbH, Oberusel
- [9] Leibfried, T. et al.: On-line monitoring of power transformers - trends, new developments and first experiences, CIGRE Session 1998, Paris, 12-211.
- [10] Dr. Viereck: Monitoring and diagnostic system TM 100 for on-load tap-changer, Transform 98, 20.-21. April 1998, Forum der Technik, Munchen.
- [11] Mikulecky, A., Čabrac, S., Godec, Z.: Istraživanje starenja izolacijskog sustava transformatora, Energija, 44(1995) 5-6, 271-277.
- [12] IEEE C 37.91-1985: Guide for protective relay (Appendix).
- [13] Mikulecky, A., Čabrac, S., Godec, Z.: Rezultati istraživanja starenja izolacije transformatora na modelima, Zbornik III. Savjetovanja HK CIGRE, 1997, R.12.06.