

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

Igor Nujić, ing.
KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
inuji@koncar-institut.hr

DJELATNI OTPOR NAMOTA - DIJAGNOSTIČKA ISKUSTVA

SAŽETAK

U dijagnostici energetskih transformatora mjerenje djelatnih otpora se koristi za provjeru stanja spojeva u namotima. Ti se spojevi zbog vibracija i pregrijavanja tijekom pogona mogu olabaviti ili oštetiti. Zbog toga se povećava prijelazni otpor, a samim time i djelatni otpor namota. Na mjestu povećanog prijelaznog otpora javlja se lokalno pregrijavanje koje izaziva termička naprezanja i stvara gubitke.

Primjeri iz prakse pokazuju učinkovitost mjerenja djelatnih otpora namota u dijagnostici energetskih transformatora. Kao zaključak nameće se činjenica da ovu metodu treba primjenjivati u redovitoj dijagnostici, ali i prilikom bilo kakvih zahvata na transformatoru koji ima za posljedicu premještanje transformatora, demontiranje provodnika i slično.

Ključne riječi: transformator, djelatni otpor namota, mjerenje, dijagnostička metoda, prijelazni otpor

WINDING RESISTANCE - DIAGNOSTICS EXPERIENCES

SUMMARY

In the diagnostics of power transformers, winding resistance measurement is used for checking connections in the windings. These connections can be loosened or damaged in service due to vibrations and overheating, what increases the contact resistance, and consequently also the winding resistance. Local overheating appears on the spot with increased contact resistance, and causes thermal stress and losses.

Examples from practice prove the efficiency of winding resistance measurement in power transformer diagnostics. The obvious conclusion is that this method should be applied both in regular diagnostics and after any interventions on the transformer which includes changing transformer location, dismounting of bushings and the like.

Key words: transformer, winding resistance, measuring, diagnostics method, contact resistance

1. UVOD

Djelatni otpor namota parametar je energetskog transformatora koji u prvom redu zanima naručitelje i proizvođače transformatora tijekom isporuke [1], ali jednako tako i ispitivače koji ocjenjuju stanje transformatora u pogonu.

Radi se o relativno jednostavnoj mjernoj metodi, kod koje se koristi ne pretjerano skupa mjerna oprema. Uz to, ne treba izgubiti iz vida činjenicu da mjerena veličina ovisi o samo jednom parametru - temperaturi namota. Sve navedeno je utjecalo da mjerenje djelatnih otpora namota predstavlja neizostavni dijagnostički alat za energetske transformatore [2].

Svrha ove metode, kao dijagnostičkog alata za transformatore u eksploataciji, je provjeriti stanje spojeva u namotima. Dodatno, kod regulacijskih transformatora, metoda služi za provjeru stanja regulacijskih kontakata u svim položajima regulacije.

Budući da na strujnom putu između dva priključka u pravilu bude više spojnih mjesta, sama metoda mjerenja djelatnog otpora neki puta nije dovoljna za točno određivanje spoja s povećanim prijelaznim otporom. Efikasnost ove metode može se poboljšati pomoću kromatografske analize plinova u transformatorskom ulju i termovizijskog snimanja priključnih mjesta na kotlu transformatora. Iako je primjena metode u praksi jednostavna, ipak se zahtijeva iskustvo i stručnost prilikom tumačenja rezultata.

2. DIJAGNOSTIČKA ISKUSTVA S MJERENJEM DJELATNIH OTPORA NAMOTA

2.1. Primjer br. 1 - Prekinute paralele VN namota

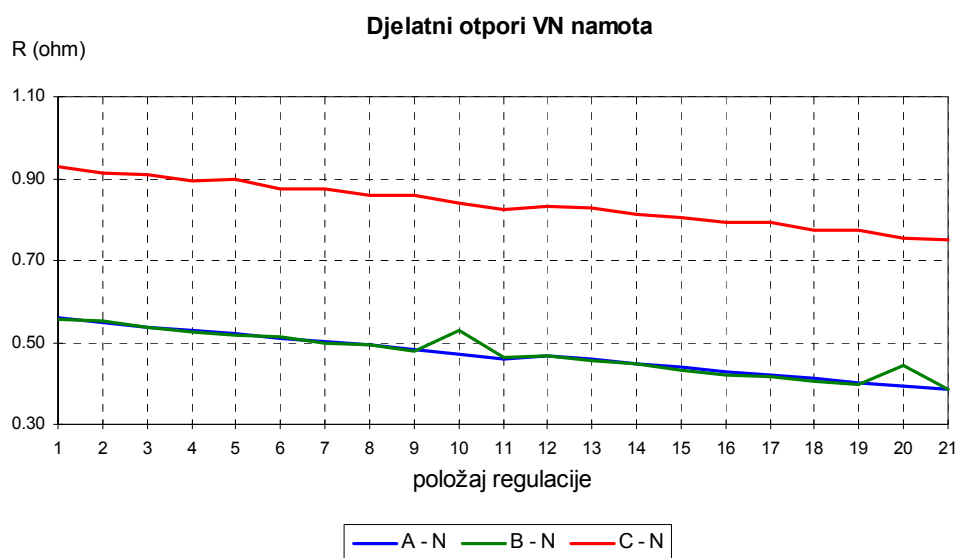
2.1.1. Podaci o transformatoru i stanje prije uočenog problema

U ovom primjeru radi se mrežnom, tronamotnom transformatoru s regulacijom na VN strani koja ima 21 položaj. Transformator je star 33 godine, snage 40 MVA i napona 110/36,75/10,5 kV, je tijekom životnog vijeka bio pod redovitim dijagnostičkim nadzorom.

Transformator u pravilu radi u paralelnom radu s teretom do 50%. Do početka dijagnostičkih ispitivanja transformator je bio u pogonu u svom uobičajenom režimu rada.

2.1.2. Tumačenje rezultata mjerenja

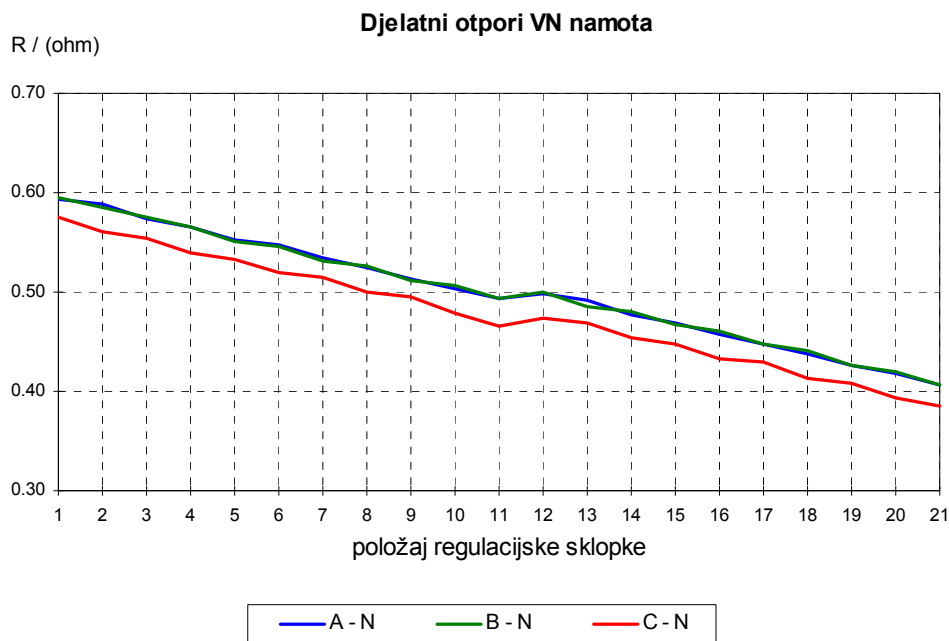
U sklopu dijagnostičkih ispitivanja izmjeren je otpor VN namota, a rezultati su grafički prikazani na slici 1.



Slika 1. Rezultati mjerenja otpora VN namota

Vidljivo je da na čitavom opsegu regulacije faza "C" ima povećan otpor za približno $0,4 \Omega$ u odnosu na faze "A" i "B". Budući se radi o tipu regulacije s predbiranjem, bitno je napomenuti da u položaju 21 struja teče samo kroz osnovni namot. Mjerenja pokazuju da je u tom položaju regulacije otpor faze "C" praktično dvostruko veći u odnosu na druge dvije faze.

Takvi rezultati mjerenja otpora namota ne zadovoljavaju kriterije za pouzdan pogon, pa je transformator isključen iz pogona. Defektažom je ustanovljen prekid dvije od četiri paralele u namotu faze "C", te je taj namot zamijenjen u tvornici. Rezultati mjerenja otpora namota nakon tvorničkog popravka dati su na slici 2.



Slika 2. Rezultati mjerenja otpora VN namota - nakon popravka

Otpor namota faze "C" se na čitavom opsegu razlikuje od faza "A" i "B" za približno 20 mΩ (oko 5% vrijednosti otpora osnovnog namota), jer je u tvornici zamijenjen namot faze "C", na što će trebati obraćati pažnju kod tumačenja rezultata budućih ispitivanja.

U navedenom primjeru radi se o nedostatku (transformator nije iz pogona izbacila zaštita, već je isključen radi dijagnostičkog ispitivanja) koji nije prerastao u kvar prvenstveno stoga jer je radio u režimu rada s 50% tereta.

2.2. Primjer br. 2 - Onečišćeni kontakti premještača u SN namotu

2.2.1. Podaci o transformatoru i stanje prije mjerenja otpora

Tronamotni transformator snage 31,5 MVA, napona 110/36,75(31,5)/10,5 kV, proizveden je prije 40 godina. Pomoću premještača SN namot transformatora se može prespojiti s 31,5 na 36,75 kV, što je kod ovog transformatora i učinjeno za vrijeme selidbe iz jedne trafostanice u drugu. Budući da u istoj trafostanici postoji transformator star samo 2 godine, predmetni transformator služi kao rezerva koja je u pogonu relativno rijetko.

2.2.2. Tumačenje rezultata mjerenja

U sklopu redovne kontrole stanja transformatora mjereni su otpori SN namota, a rezultati su prikazani u tablici I.

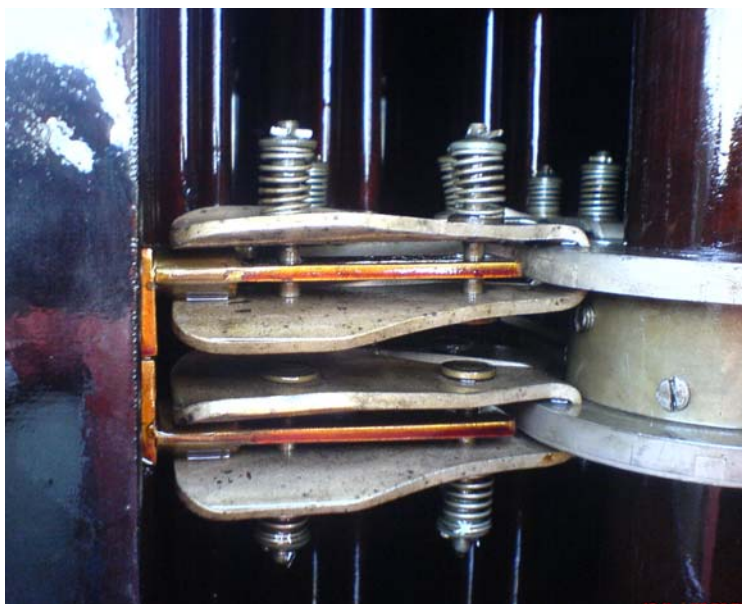
Otpor SN namota u fazi "mB" je povećan za približno 16 mΩ, odnosno 19 mΩ u odnosu na otpore faza "mA" i "mC", što ukazuje na povećani prijelazni otpor na nekom kontaktu/spoju na strujnom putu između priključaka "mB" i "mN".

Vlasnik transformatora je pregledao transformator na terenu. Otvoren je revizijski otvor u blizini premještača SN namota i pregledani su kontakti premještača (slika 3.). Kontakti su očišćeni, a premještač nekoliko puta premješten iz jednog položaja u drugi i obratno.

Tablica I. Otpori SN namota prije i nakon sanacije

Otpor SN namota mjen između priključaka	R / mΩ (prije sanacije)	R / mΩ (nakon sanacije)
mA - mN	72,25	66,55
mB - mN	88,46	68,12
mC - mN	69,33	66,38

Odmah potom izmjereni su otpori SN namota "u suhom", bez punjenja transformatora do vrha kotla. Dobiveni su rezultati dani u tablici I.



Slika 3. Kontakti premještača na SN namotu

Iz dobivenih rezultata jasno se vidi da se prijelazni otpor znatno smanjio nakon sanacije kontakata pri čemu su uklonjene nečistoće na kontaktima. Na taj je način otklonjeno mjesto potencijalnog pregrijavanja.

U sklopu redovnog održavanja transformatora s regulacijom poželjno je periodički "proraditi" sve kontakte, čak i one koji se rijetko ili nikako ne koriste u pogonu, kako ne bi došlo do skupljanja naslaga oksida na njima. Mjerenje otpora namota prije i nakon sličnih zahvata može poslužiti za potvrdu uspješno obavljenog posla.

2.3. Primjer br. 3 - Pregrijavanje spoja svornik-izvod VN namota

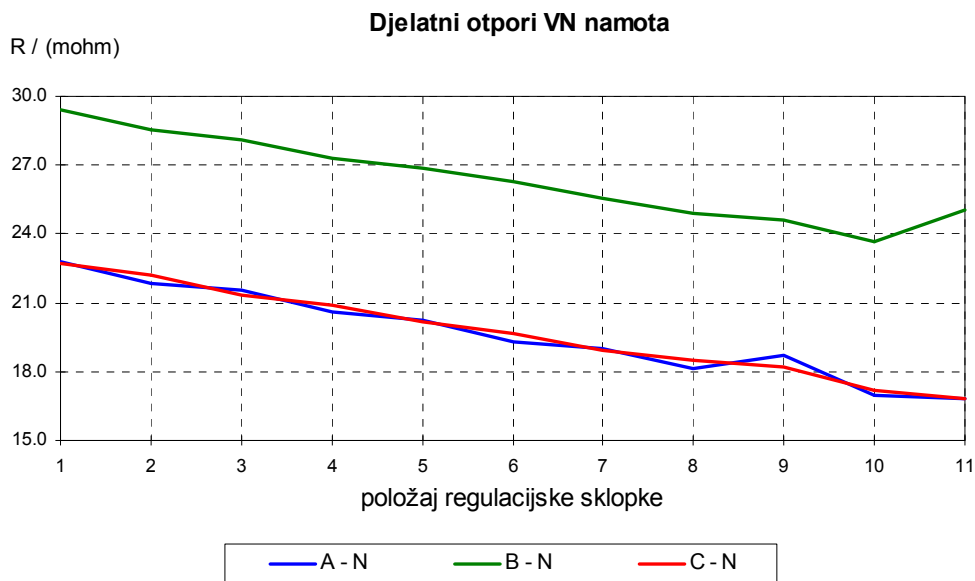
2.3.1. Podaci o transformatoru i stanje prije dijagnostičkih ispitivanja

Tronamotni transformator snage 13 MVA, napona 10,5/6,3/(6,3) kV, star je 41 godinu, a prije 10 godina obavljen je remont transformatora. Za razliku od prethodna dva primjera kada je problem uočen u sklopu redovnog ispitivanja, u ovom slučaju dijagnostička mjerenja su primijenjena nakon što je primijećeno curenje ulja na gornjoj brtvi provodnika u fazi "B" na VN namotu.

2.3.2. Tumačenje rezultata mjerenja

Rezultati mjerenja otpora VN namota su prikazani na slici 4. Na čitavom području regulacije, u fazi "B" je povećan otpor približno za 7 mΩ u odnosu na druge dvije faze. Zbog toga, a i zbog curenja ulja na provodniku iste faze, skinut je provodni izolator faze "B".

Vizualnim pregledom uočeni su tragovi pregrijavanja spoja svornik-izvod namota (vidi sliku 5.), što je dovelo do termičkog oštećenja brtve na provodniku zbog čega je ulje istjecalo na poroznom dijelu brtve. Također je ustanovljeno da svornik nije bio do kraja uvrnut u izvod namota. Čišćenjem izvoda i svornika, te zamjenom brtve, kvar je saniran.



Slika 4. Rezultati mjerenja otpora VN namota



Slika 5. Tragovi pregrijavanja na svorniku i izvodu faze "B" VN namota

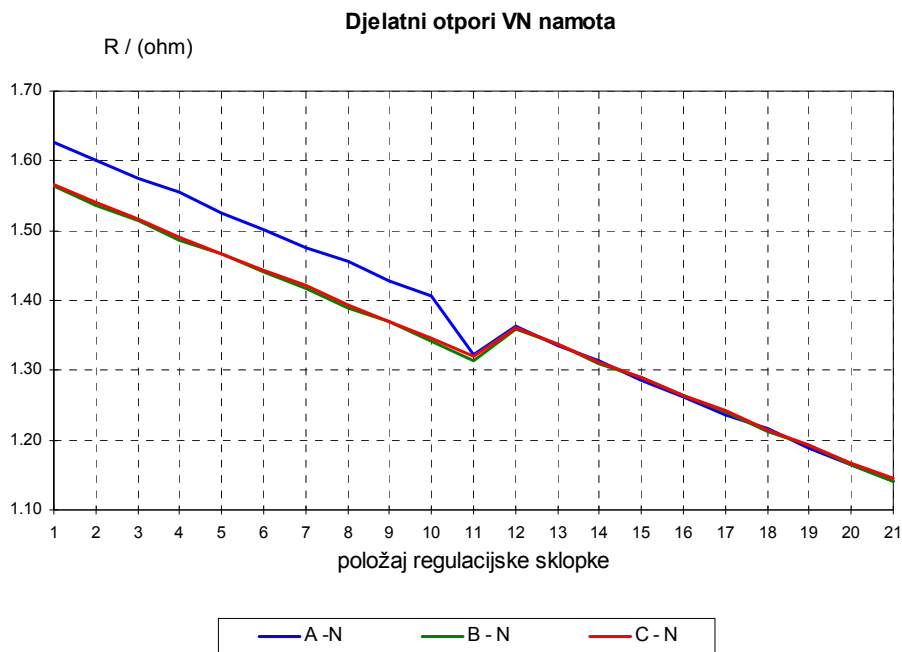
2.4. Primjer br. 4 – Povećan otpor kontakata predbirača

2.4.1. Podaci o transformatoru

U zadnjem primjeru radi se o transformatoru snage 20 MVA, napona 110/36,75/10,5 kV, proizvedenom prije 44 godine, s regulacijom na VN strani. Dijagnostika transformatora ukazivala je na problem s povećanim otporima VN namota. Zbog toga, a i zbog starosti, transformator je ispitivan učestalije nego je to uobičajeno.

2.4.2. Tumačenje rezultata mjerenja

Mjerenjem otpora VN namota uočeno je da faza A u položajima regulacije od 1 do 10 ima povećani otpor u odnosu na druge dvije faze, što se vidi na slici 6.

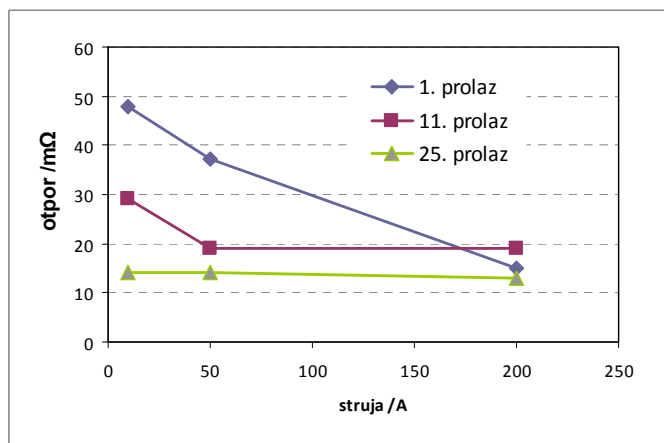


Slika 6. Rezultati mjerenja otpora VN namota s prijelaznim otporom u fazi A

Povećanje otpora iznosilo je približno 60-tak $\text{m}\Omega$ na području regulacije od položaja 1 do položaja 10. Pretpostavljeno je da je došlo do povećanja otpora na kontaktima predbirača. U takvim se dijagnostičkim slučajevima preporuča mjerenje strujne ovisnosti prijelaznih otpora kontakata.

Mjerenje strujne ovisnosti kontakata je dijagnostička metoda koja se zbog svoje zahtjevnosti (višesatno isključenje transformatora, demontaža teretnog dijela preklopke, zahtijeva se specijalističko poznavanje regulacijske preklopke i sl.) primjenjuje tek nakon što mjerenje otpora namota ukaže na moguće nedostatke na kontaktima. Dva su moguća nalaza nakon primjene metode strujne ovisnosti.

Jedan mogući nalaz je da loš rezultat mjerenja strujne ovisnosti otpora kontakata ukazuje na trajno loš kontakt kojeg treba zamijeniti kako ne bi dolazilo do njegova pregrijavanja tijekom pogona transformatora.



Slika 7. Rezultati mjerenja strujne ovisnosti kontakta

Drugi, povoljniji, nalaz ove metode je da je povećanje prijelaznog otpora nestalo tijekom mjerenja strujne ovisnosti. Drugim riječima onečišćenje kontakta je mehanički uklonjeno. Na slici 7. prikazan je graf s rezultatima mjerenja za jedan od kontakata u navedenom primjeru. Budući je nakon 25. prolaza preko kontakta nestala strujna ovisnost prijelaznog otpora, to znači da je kontakt mehanički očišćen, te da tijekom pogona transformatora neće biti izvor pregrijanja.

3. ZAKLJUČAK

Višegodišnja iskustva s mjerenjima djelatnih otpora namota pokazuju da se radi o dijagnostičkom alatu koji se efikasno primjenjuje kod manjih nedostataka koji ne zahtijevaju sanaciju već samo pojačani nadzor, te kod većih nedostataka koji mogu prijeći u kvar i imati za posljedicu ispad transformatora iz pogona.

Navedeni primjeri pokazuju nekoliko karakterističnih slučajeva u kojima se javljaju povećani prijelazni otpori na spojnim mjestima u namotima transformatora. Matematički gledano, prijelazni otpori se pribrajaju otporima pojedinih namota. U fizikalnom smislu, radi se o mjestima potencijalnih pregrijavanja koja mogu oštetiti okolnu izolaciju te, u krajnjem slučaju, prouzročiti prekid namota.

Osim u svrhu redovne dijagnostike stanja transformatora, mjerenje djelatnih otpora praktično je primijeniti i kod sanacija na terenu, primjerice dotezanja ili čišćenja kontaktnih spojeva, jer se mjerenjem djelatnih otpora namota može verificirati obavljeni posao.

Poznavanje referentnih vrijednosti otpora namota, tj. tvorničkih mjerenja, kao i praćenje trenda porasta otpora kod ponovljenih mjerenja, u znatnoj mjeri pomaže pri dijagnosticiranju stanja spojeva u namotima i procjeni pouzdanosti daljnjeg pogona transformatora.

LITERATURA

- [1] A. Carlson, J. Fuhr, G. Schemel, F. Wegscheider, "Testing of Power Transformers", ABB, Zurich, 10. 2003.
- [2] A. Mikulecky, Z. Godec, S. Čabrajac, "Prijedlog preporuka za redovito održavanje energetskih transformatora nazivnih snaga većih od 5 MVA", Končar - IET, 09. 1993.