

TEMPERATURNI MONITORING ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

TEMPERATURE MONITORING OF POWER TRANSFORMERS

Midhat Umihanić¹, Vlado Madžarević²

Sažetak: Jedan od načina smanjenja troškova pogona i povećanja raspoloživosti transformatora jeste primjena dijagnostike, a u posljednje vrijeme primjena sistema monitoringa transformatora. To je opsežan i raznovrstan zadatak po pitanju izbora sistema i načina uvođenja. U radu je predstavljen koncept temperaturnog monitoringa transformatora koji ima za cilj otkrivanje poremećaja u ranoj fazi razvoja, kao jednog od podsistema cjelokupnog sistema monitoringa transformatora. Temperaturnim monitoringom transformatora omogućava se pravovremeno djelovanje na sprečavanju uzročnika povišene temperature, a samim tim i na povećanju životne dobi transformatora. U radu je napravljen pregled dosadašnjeg razvoja na ovom području i predstavljene smjernice daljnjeg razvoja.

Ključne riječi: energetski transformator, monitoring, temperatura, fiber optički sensor, senzor temperature

Abstract: One of the ways to reduce costs and increase plant availability is the use of transformer diagnostics, and recently also the application of the monitoring system of transformers. It has an extensive and far-reaching task when it comes to selection of systems and methods of introduction. The paper introduces the concept of transformer temperature monitoring, which aims to detect the disorder in its early stages, as one of the subsystems of the overall transformer monitoring system. Temperature-based monitoring of the transformers enables us to act in time by preventing the cause of temperature rising, thus prolonging the life of a transformer. The paper is an overview of current developments in this field and presents guidelines for further developments.

Key words: power transformer, monitoring, temperature, optical fiber sensor, temperature sensor

UVOD

Monitoring kao disciplina razvio se kao nadopuna dijagnostičkim ispitivanjima energetske opreme (transformatori, generatori, prekidači, itd.). Dijagnostika je određivanje stanja opreme. Dijagnostička ispitivanja opreme su periodičnog karaktera, što znači da se provode nakon isteka određenog vremenskog perioda od zadnjeg ispitivanja. Ovisno o vrsti i stanju opreme, o mogućnostima zamjene opreme i slično, period ispitivanja može varirati od nekoliko sedmica pa do više godina. Nalazi dijagnostičkih ispitivanja korisniku daju informaciju o stanju opreme u trenutku ispitivanja. Međutim, nakon uključivanja opreme u pogon, korisnik nema informaciju o eventualnom razvoju kvara, ako nema „vidljivih“ pokazatelja razvoja kvara. Pod „vidljivim“ pokazateljima podrazumijevaju se svi pokazatelji koji se mogu uočiti bez isključivanja opreme iz pogona (naprimjer povećana buka, povećano zagrijavanje, pojava dima ili iskrenja, pojačane vibracije, mehaničke deformacije, curenje ulja i slično).

Dajući stalan uvid u stanje opreme, monitoring omogućuje rano otkrivanje poremećaja (u nastanku).

Uočavanje poremećaja u samom razvoju omogućuje:

- sprečavanje kvara ili smanjenje posljedica kvara,
- održavanje na osnovu stanja,
- optimiziranje upravljanja opremom (preopterećivanje, procjena preostalog vremena trajanja, produženje vijeka trajanja, odgađanje zamjene, itd.).

Monitoring je, dakle, tehnika ili proces nadzora radnih karakteristika opreme na način da se na osnovu promjena i trendova nadziranih karakteristika može predvidjeti potrebni opseg održavanja prije nastanka oštećenja ili kvara i da se može odrediti „zdravstveno“ stanje opreme.

Temperaturni monitoring je jedan od važnijih podsistema cjelovitog sistema monitoringa energetskih transformatora.

1. CILJEVI UVOĐENJA MONITORINGA

Ciljevi za uvođenje sistema monitoringa nisu samo sprečavanje kvarova, smanjenje posljedica kvarova i smanjenje broja neplaniranih ispada. Ciljevi mogu biti različiti i višestruki: održavanje na osnovu stanja, produženje vijeka trajanja, kontrolisano preopterećivanje, itd.

Kvar transformatora može uzrokovati veliku materijalnu štetu, ozljede ili smrt osoblja, zagađenje okoliša, narušiti ugled kompanije, te uzrokovati velike finansijske gubitke i

¹ JU MSŠ Živinice, Bosna i Hercegovina
midhatu@live.com

² Univerzitet u Tuzli, Fakultet elektrotehnike, Bosna i Hercegovina

Rad dostavljen: juli 2014. Rad prihvaćen: novembar 2014.

obaveze. Važan cilj vlasnika transformatora je smanjenje broja kvarova i njihovih posljedica. Sistemi monitoringa su prepoznati kao alat koji pomaže u ostvarenju tog cilja i prvenstveno se uvode u primjenu zbog sprečavanja kvarova.

Često je cilj uvođenja sistema monitoringa transformatora povećanje pouzdanosti elektroenergetskog sistema i ostvarivanje uštede prelazom s vremenski bazirane dijagnostike i održavanja na dijagnostiku i održavanje na osnovu stanja CBM (engl. *Condition Based Maintenance*) ili pouzdanosti RCM (engl. *Reliability Centred Maintenance*). Tradicionalno se dijagnostička ispitivanja obavljaju nakon proteka određenog vremenskog perioda od zadnjeg ispitivanja. U uslovima kad na transformatoru postoji odgovarajući sistem monitoringa, koji obuhvata monitoring određenih dijelova transformatora, vremenski bazirana dijagnostika više nije potrebna, jer se na osnovu informacija iz sistema monitoringa može procijeniti je li došlo do promjena u transformatoru ili nije. Ako je do promjena došlo potrebno je napraviti dijagnostička ispitivanja. Ako i dijagnostika potvrdi promjene, potrebno je poduzeti određene zahvate u smislu održavanja transformatora, a ako dijagnostičko ispitivanje opovrgne promjene, nije potrebno primijeniti određeni postupak održavanja. Naravno da je za ovakav pristup ispitivanju i održavanju potrebno prilagoditi organizaciju i procedure u elektroprivrednoj organizaciji.

Cilj uvođenja sistema monitoringa može biti i kontrolisano preopterećivanje transformatora (opterećenje iznad nazivnih vrijednosti) i kontrolisani potrošak vijeka trajanja. Ovakva primjena sistema monitoringa dolazi do izražaja kad su u mreži ili u okruženju takve prilike da se energija mora prenijeti, „bez obzira na posljedice“ (kritični potrošači koji ne smiju ostati bez energije, iznenadne promjene u sistemu – ispad nekog dalekovoda u sistemu, ispad elektrane itd.), odnosno kad su prihodi od tako prenesene energije veći od troška ubrzanog trošenja vijeka trajanja opreme. Sistem monitoringa u ovakvim ili sličnim situacijama daje korisniku (dispečeru, operateru itd.) mogućnost bolje procjene stanja i mogućnosti.

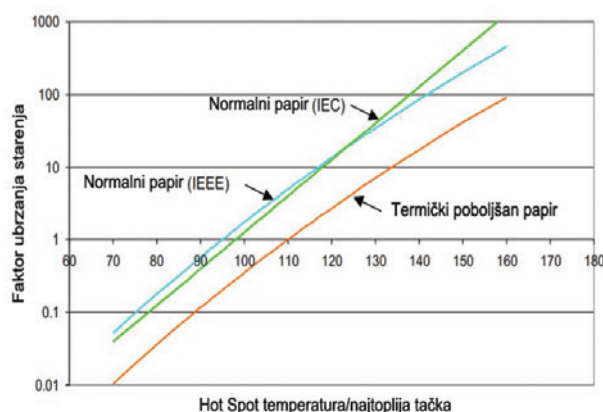
2. METODE MJERENJA TEMPERATURE TRANSFORMATORA

Metode mjerenja temperature danas u svijetu zastupljene su u velikom broju. Međutim, njihova primjena je uzrokovana svrhom mjerenja i mjestom mjerenja. Mjerenje temperature transformatora je veoma bitno iz razloga što temperatura zavisi od opterećenja transformatora. S povećanjem opterećenja transformatora povećava se i temperatura transformatora, odnosno temperatura namotaja transformatora i temperatura izolacije. Temperatura znatno utiče na vijek trajanja izolacije pa je veoma bitno voditi računa o tome da ne dođe do pregrijavanja transformatora, odnosno pregrijavanja izolacije.

Cilj mjerenja temperature transformatora je pratiti transformator pri punom opterećenju i pratiti da prosječna temperatura transformatora ne prelazi vrijednosti koje su definisane industrijskim standardima. Međutim, temperatura namotaja nije svugdje ista i nema uniformnu raspodjelu, tako da se pojedini dijelovi namota više zagrijava u odnosu na druge. Zbog toga se uvodi pojam najtoplije tačke namota (engl. *hot spot*). Područje najtoplije tačke nije dostupno za direktno mjerenje uobičajenim metodama.

S obzirom da životni vijek transformatora i sigurnost rada u mreži u najvećoj mjeri zavisi od životnog vijeka njegove izolacije, prvenstveno čvrste, potrebno je voditi računa da ne dođe do njenog pregrijavanja. Temperatura čvrstih izolacija je glavni faktor starenja izolacije, a samim tim i transformatora. Pod utjecajem visoke temperature, kao osnovnog faktora degradacije, nepovratno se kidaju veze na mjestima spoja polimera, gde su najslabije energetske tačke i dovode do trajne degradacije izolacije. Na kraju papir postaje krhak i nije sposoban podnijeti čak i normalne vibracije koje se pojavljuju i pri normalnom radu transformatora. Ova situacija karakteriše kraj života čvrste izolacije, tj. kraj životnog vijeka transformatora. Ovaj proces degradacije i starenja izolacije je poznat i zbog toga se vrši praćenje temperature transformatora i okoline kako ne bi došlo do pregrijavanja izolacije i smanjenja njenog životnog vijeka, a samim tim i smanjenja životnog vijeka transformatora. Na Slici 1 je prikazana osjetljivost papira na temperaturu.

Moderni transformatori koriste termički poboljšane papire (termički unaprijeđene papire koju mogu podnijeti veće termičko opterećenje) koji su hemijski tretirani za poboljšanje stabilnosti strukture celuloze.



Slika 1: Utjecaj temperature na starenje izolacije [1]

Nazivne temperature najtoplije tačke za ovu vrstu izolacije su 110°C, a može se vidjeti da će povećanje temperature od 7°C udvostručiti faktor ubrzanja starenja. Kod starijih transformatora koji koriste normalni papir kao izolaciju nazivna temperatura najtoplije tačke je 95°C u skladu sa IEEE standardima, ili 97°C prema IEC standardima [1].

Primjera radi ako pretpostavimo da je temperatura najtoplije tačke 140°C onda je faktor ubrzanja starenja oko 100, što znači da je jedan sat rada u ovom stanju ekvivalent za 100 sati rada u normalnom režimu rada.

Metode mjerenja temperature globalno se dijele u dvije grupe i to [2]:

- direktne metode mjerenja temperature,
- indirektno metode mjerenja temperature.

Direktne metode mjerenja temperature su one metode pomoću kojih direktno očitavamo temperaturu najtoplije tačke transformatora. To se izvodi tako što se na namot postave odgovarajući senzori temperature i na taj način se može direktno očitati vrijednost temperature namota. Prednost direktnih metoda mjerenja temperature je u tome što su vrlo pouzdane i imaju veliku tačnost. Mana im je što je ugradnja ovakvih mjernih senzora moguća samo kod novih transformatora prilikom njegove izrade.

Indirektno metode mjerenja temperature transformatora su metode koje se zasnivaju na proračunu. Vršiti se mjerenje određenih parametara pomoću kojih se može izračunati najtoplija tačka transformatora. Osnovna metoda proračuna temelji se na mjerenju temperature ulja na vrhu kotla transformatora (zato što je ulje u transformatoru najtoplije na vrhu kotla) i na osnovu simulacije temperature najtoplije tačke. Simulacija najtoplije tačke podrazumijeva dodatno zagrijavanje temperaturno osjetljivog elementa. Dodatno zagrijavanje je potrebno zbog toga što je temperatura ulja neposredno uz namot transformatora veća od temperature ulja u džepu kotla gdje je smješten temperaturno osjetljivi element. Ova razlika temperatura neposredno uz namotaj i neposredno u džepu kotla gdje se vrši mjerenje, posljedica je neravnomjerne raspodjele temperature u ulju transformatora. Na osnovu tih parametara može se izračunati najtoplija tačka transformatora.

3. TEMPERATURNI MONITORING DIREKTNIM MJERENJEM TEMPERATURE TRANSFORMATORA

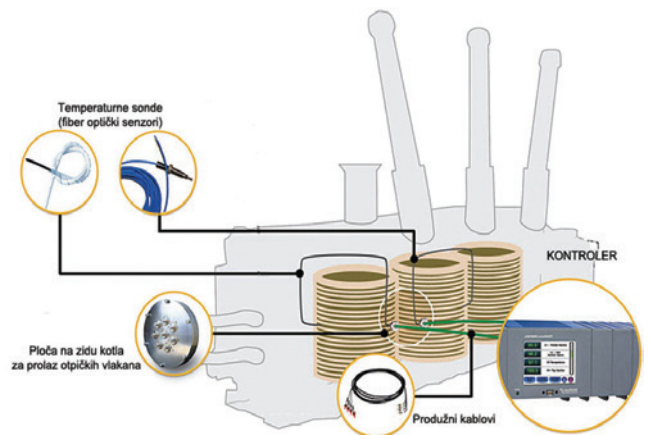
Koncept temperaturnog monitoringa transformatora s direktnim mjerenjem temperature bazira se direktnoj metodi mjerenja temperature pomoću fiber optičkih senzora koji se postavljaju direktno na namotaj transformatora ili na razmaknicu između namotaja. Na Slici 2 prikazan je izgled fiber optičkog senzora za mjerenje temperature proizvođača neoptix [3].

Shematski prikaz mjerenja temperature najtoplije tačke transformatora, direktnom metodom pomoću fiber optičkih senzora prikazan je na Slici 3 [4].

Slika 3 pokazuje glavne komponente fiberoptičkog sistema mjerenja temperature. Fiberoptički se senzori temperature smještaju tamo gdje se očekuje najveća temperatura i to na vrhu visokonaponskog namotaja i srednjonaponskog (niskonaponskog) namotaja, a mogu i na druga



Slika 2: Izgled fiber optičkog senzora za mjerenje temperature [3]



Slika 3: Shematski prikaz mjerenja temperature najtoplije tačke transformatora fiber optičkim senzorom [4]

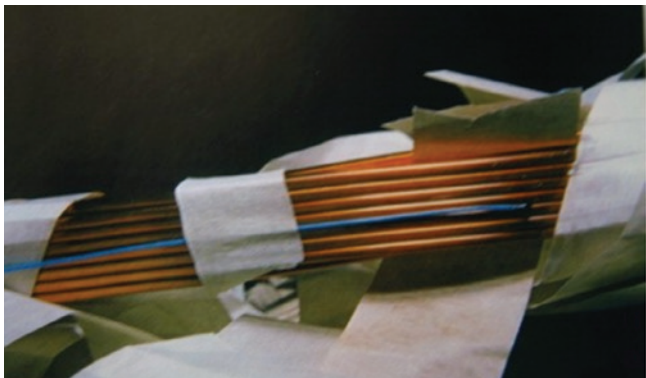
mjesta unutar transformatora npr. mjesta strujanja ulja ili druga mjesta interesantna za eksploataciju istog. Od senzora nadalje se pruža teflonom zaštićeni optički kabel do sklopa, koji omogućava prolaz svjetlosti kroz kućište transformatora (Slika 4), a na kome se grupišu svi kablovi korišteni za monitoring stanja transformatora. Od prolaznog sklopa prema vani polazi sada snop fiber optičkih kablova, koji se odvođe do kontrolnog ormarića u koji smještamo mjerni sistem obrade svjetlosne informacije.



Slika 4: Sklop koji omogućava prolaz svjetlosti kroz kućište transformatora [1]

U sklopu mjernog sistema svjetlost se pretvara u električni signal koji se dalje mjernim softverom pretvara u digitalni broj koji se očitava na displeju uređaja ili se dalje šalje na server koji može biti udaljen od transformatora. Ugradnja ovih senzora je moguća samo u nove transformatore.

Fiber optički senzor može biti postavljen direktno na namot transformatora kao što je prikazano na Slici 5.



Slika 5: Primjer postavljenog fiber optičkog senzora za mjerenje temperature na namot [1]

Na Slici 5 se može vidjeti način na koji je postavljen fiber optički senzor [1]. Može se primijetiti da je na mjestu ugradnje senzora uklonjena papirna izolacija. Nakon što je senzor postavljen na namotaj mora se ponovo obnoviti izolacija na mjestu gdje je postavljen senzor. Izgled namotaja i postavljenog senzora nakon obnovljene izolacije prikazan je na Slici 6.



Slika 6: Primjer postavljenog fiber optičkog senzora na namot i obnavljanje izolacije [1]

Vidi se da se kod postavljanja senzora na namot mora vršiti otklanjanje izolacije i ponovo je obnavljati. Da bi se izbjeglo otklanjanje i obnavljanje izolacije primjenjuje se sve popularnija metoda postavljanja senzora na razmak između uzastopnih namotaja (Slika 7) [5].

Na Slici 8 prikazan je transformator sa postavljenim fiber optičkim senzorima, a na Slici 9 je prikazan „završen“ transformator s fiber optičkim sistemom za temperaturni monitoring.



Slika 7: Primjer postavljenog fiber optičkog senzora na razmaknicu između diskova [5]



Slika 8: Postavljeni fiber optički senzori na transformatoru [3]



Slika 9: Postavljen fiber optički sistem na transformatoru [1]

4. TEMPERATURNI MONITORING INDIREKTNIM MJERENJEM TEMPERATURE TRANSFORMATORA

Mjerenje temperature transformatora na osnovu temperature ulja u kotlu transformatora spada u indirektnu metodu mjerenja temperature. Pomoću ove metode vrši se mjerenje temperature ulja i vrši procjena, odnosno proračun temperature transformatora, odnosno najtoplije tačke namota.

Postoji nekoliko standarda za procjenu, odnosno proračun najtoplije tačke namota unutar transformatora kao funkcija struje opterećenja i klime ambijenta u kome se nalazi transformator. Mnoge su elektroprivrede koristile ove standarde kao osnovu za njihove operativne procedure, kreiranje tabela i crtanje grafika koji naglašavaju izloženost rizicima u okviru mreže. Međutim, prilikom procjene najtoplije tačke može doći do određene greške pa je zbog toga potreban oprez prilikom procjene i izbora standarda. U ovom radu su opisana dva standarda koji se koriste za procjenu najtoplije tačke i to IEC 354:1991 i IEEE C57.91-1995 standard.

4.1. IEC 354:1991 standard

IEC 354:1991 je standard međunarodne elektrotehničke komisije (IEC – International Electrotechnical Commission) koji daje niz pojednostavljenih jednačina koje opisuju matematički model za proračun temperature transformatora [6]. Ovaj standard za procjenu, odnosno proračun temperature transformatora ima i određene pretpostavke koje uključuju:

- porast temperature ulja linearan je od dna do vrha kotla transformatora,
- porast temperature u svim je namotajima isti,
- dodatak za slučajne gubitke koji su od koristi za procjenu najtoplije tačke.

Ovaj standard se ne može primjenjivati za procjenu temperature na transformatorima velike snage zbog složenosti doprinosa curenja fluksa na zagrijavanje namotaja. Zbog toga metoda koju definiše ovaj standard ima ograničenu upotrebu. Bitno je napomenuti da se ovom standardu dodaju korekcije za gubitke usljed opterećenja i viskoznosti ulja, takođe mogu biti zanemarene kao beznačajne ili da se efekti međusobno poništavaju.

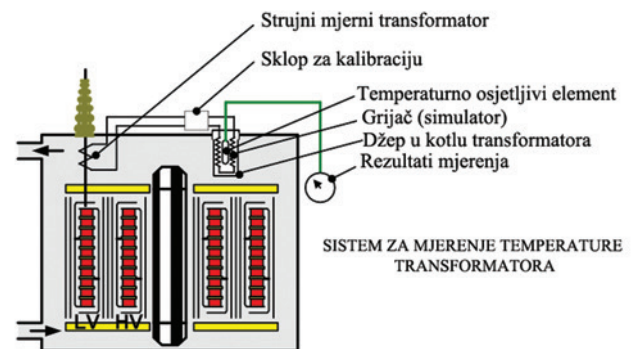
4.2. IEEE C57.91-1995 standard

IEEE C57.91 – 1995 je standard instituta inženjera elektrotehnike i elektronike (IEEE – The Institute of Electrical and Electronic Engineers) za uljne transformatore. Standard IEEE ima dvije metode proračuna najtoplije tačke transformatora [6]. Prva metoda, kao i kod IEC standarda, je matematički model. Prilikom proračuna pretpostavlja se da je temperatura ulja neposredno uz namotaje jednaka temperaturi ulja na vrhu kotla transformatora. Na početku se smatralo da je ova pretpostavka tačna. Međutim, razvojem fiber optičkih senzora i primjenom istih za mjerenje temperature pokazalo se da je ova pretpostavka pogrešna. Druga metoda IEEE standarda (Aneks G) uzima u obzir prethodna zapažanja i pokušava ispraviti prethodnu metodu, uključujući i termoeffekte i viskoznost ulja u uslovima preopterećenja transformatora.

4.3. Određivanje temperature na osnovu temperature na vrhu kotla transformatora

Ova metoda mjerenja temperature transformatora bazira se na tome da se mjeri temperatura ulja na vrhu kotla transformatora i na osnovu te temperature se vrši procjena, odnosno simulacija najtoplije tačke namota [2].

Temperatura u kotlu transformatora mjeri se temperaturno osjetljivim elementom, a to je najčešće kontaktni termometar. Simulacija najtoplijeg mjesta najčešće se ostvaruje grijačem odgovarajuće snage i toplotne tromosti, koji se napaja strujom iz strujnog transformatora, koja je proporcionalna struji opterećenja sa sekundara transformatora, Slika 10. Izvedba simulatora mora omogućiti da se vrijednost koeficijenata proporcionalnosti struje i vremenska konstanta mogu prilagoditi namotu transformatora koji se simulira.



Slika 10: Shematski prikaz mjerenja temperature najtoplije tačke [2]

Ova simulacijska metoda podrazumijeva izračunavanje (simulaciju) najtoplije tačke namota na osnovu temperature ulja na vrhu kotla transformatora i na osnovu dodane simulirane temperature, kako je opisano izrazom (1):

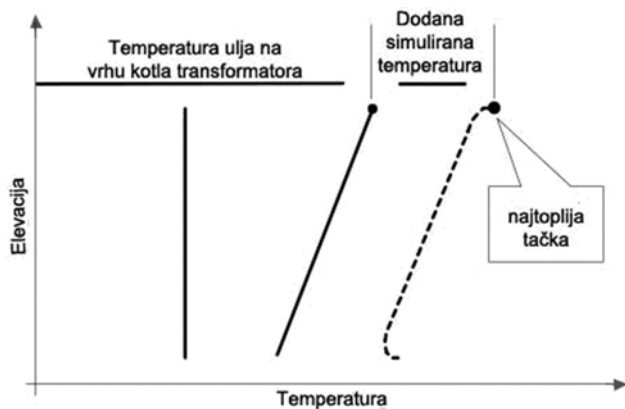
$$\Theta_{HS} = \Theta_{TO} + \Delta\Theta_{HR} \cdot K^{2m} \quad (1)$$

gdje je:

- Θ_{HS} – temperatura najtoplije tačke namota,
- Θ_{TO} – temperatura ulja na vrhu kotla (engl. top oil temperature),
- $\Delta\Theta_{HR}$ – dodana simulirana temperature,
- K – faktor opterećenja transformatora,
- m – toplotna inertnost namota (obično je približno 1).

Ova metoda temelji se na termodijagramu koji je prikazan na Slici 11. Pokazalo se da ova metoda nije adekvatna za određivanje temperature pri dimaničkim uslovima opterećenja zbog sljedećih razloga:

- temperatura ulja neposredno uz namotaj može biti puno veća od temperature ulja na vrhu kotla,
- pri iznenadnim varijacijama opterećenja potrebno je duže vrijeme da ulje procirkuliše i prenese temperature.



Slika 11: Termodijagram koji uzima u obzir temperaturu ulja na vrhu kotla [2]

4.4. Određivanje temperature na osnovu temperature na dnu kotla transformatora

Puno bolji rezultati mogu se dobiti kada se proračun temelji na temperaturi ulja koja se mjeri na dnu kotla i porastu temperature ulja u rashladnom kanalu prema izrazu (2) [2]:

$$\Theta_{HS} = \Theta_{BO} + \Delta\Theta_{WO/BO} + \Delta\Theta_{HS/WO} \quad (2)$$

gdje je:

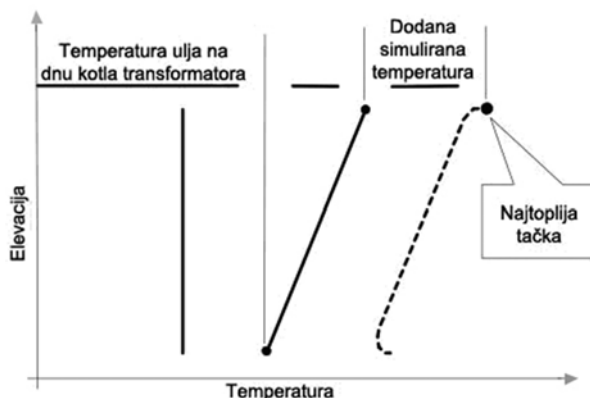
Θ_{HS} – temperatura najtoplije tačke namota,

Θ_{BO} – temperatura ulja na dnu kotla (engl. bottom oil temperature),

$\Delta\Theta_{WO/BO}$ – porast temperature u rashladnom kanalu,

$\Delta\Theta_{HS/WO}$ – dodana simulirana temperature.

Ova metoda temelji se na termodijagramu koji je prikazan na Slici 12.



Slika 12: Termodijagram koji uzima u obzir temperaturu ulja na dnu kotla [2]

4.5. Koncept temperaturnog monitoringa indirektnim mjerenjem

Kod temperaturnog monitoringa transformatora s indirektnim mjerenjem temperature mjeri se temperatura ulja na vrhu kotla transformatora i na osnovu te temperature se vrši procjena, odnosno simulacija najtoplije tačke namota.

Temperatura najtoplije tačke namota mjeri se analognom termoslikom tako da se mjeri temperatura ulja u kotlu

transformatora kojoj se pridodaje simulirana temperatura zagrijanja najtoplije tačke namota prema ulju. Temperatura u kotlu transformatora mjeri se temperaturno osjetljivim elementom Pt100. Simulator najtoplijeg mjesta ostvaruje se grijačem odgovarajuće snage i toplotne tromosti, koji se napaja strujom iz strujnog transformatora, koja je proporcionalna struji opterećenja sa sekundara transformatora. Izvedba simulatora mora omogućiti da se vrijednost koeficijenta proporcionalnosti struje i vremenska konstanta mogu prilagoditi namotu transformatora koji se simulira.

Temperatura ulja se u sistemu monitoringa transformatora mjeri Pt100 senzorima koji se ugrađuju na odgovarajuća mjesta na transformatoru (džepovi kotla, ulazi i izlazi iz hladnjaka, temperatura okoline) [7]. Izgled Pt100 senzora i mjesto njegove ugradnje prikazan je na Slici 13.



Slika 13: Izgled Pt100 senzora temperature i mjesto ugradnje [7]

Kako bi sistem monitoringa mogao prikupljati mjerene veličine i druge podatke on mora imati odgovarajuće module za analognu - digitalnu pretvorbu signala i vremensko označavanje. Analogni ulazni modul prikuplja podatke sa senzora s analognim izlazima, RTD (engl. *Resistive Temperature Detector*) modul detektuje temperature mjerenjem otpora Pt100 sonde. Svi prikupljeni podaci se proslijeđuju procesorskoj jedinici (kontroleru) sistema monitoringa na kojoj se izvodi aplikacija za monitoring.

Platinski temperaturni detektor Pt100 (RTD) je senzor s otporom 100 Ω na 0°C. Sastoji se od tankog filma platine na plastičnom filmu. Njegov otpor je ovisan o temperaturi i može mjeriti temperature do 850°C. Prolazak struje kroz RTD generiše napon. Mjerenjem ovog napona može se odrediti vrijednost otpora, a samim tim i njegova temperatura. Odnos između otpora i temperature je relativno linearan. Na Slici 14 prikazana je fizička arhitektura Pt100 temperaturnog detektora



Slika 14: Arhitektura temperaturnog detektora Pt100 [8]

Kao što je već prethodno rečeno, prednost ove metode mjerenja temperature transformatora mjerenjem temperature ulja pomoću Pt100 senzora je ta što ju je moguće aplicirati kako na nove, tako i na već postojeće transformatore u radu.

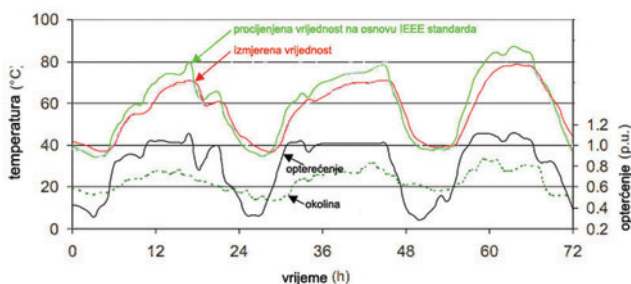
Mana ove metode je u tome što se ovdje ne mjeri direktno temperatura namota transformatora, već se mjeri temperatura ulja u kotlu transformatora pa se pomoću nje vrši procjena temperature namota transformatora. Zbog toga može doći do greške prilikom mjerenja iz razloga što temperatura namota i temperatura ulja nisu iste, jer je temperatura namota uvijek veća od temperature ulja.

5. REZULTATI MJERENJA

Na Slici 15 prikazan je primjer izmjerenih temperatura korištenjem direktne metode mjerenja (izmjerena vrijednost) i izračunata vrijednost temperature na osnovu IEEE standarda (procijenjena vrijednost na osnovu IEEE standarda). Parametri transformatora na kome je vršeno mjerenje su:

- Tip: Converter-transformator, ODAF hlađenje
- Snaga: 107 MVA, jednofazni
- Primarni namotaj: $230/\sqrt{3}$ kV, 810A, uzemljenje Y
- sekundarni namotaj: $127/\sqrt{3}$ kV, 1468A, Y
- tercijarni namotaj: 18.2 kV.

Sa slike se može vidjeti da je razlika izmjerene i izračunate vrijednosti pri nominalnom opterećenju oko 7°C , što bi kod opterećenja transformatora od 150 % od nominalnog iznosilo oko 14°C .



Slika 15: Izmjerene i procijenjene vrijednosti temperature [1]

Iz ovog se može zaključiti da je mjerenje temperature transformatora direktnom metodom pouzdanije i da daje tačnije rezultate, što je od velike važnosti kad je riječ o temperaturnom monitoringu transformatora, jer je temperatura jedna od najvažnijih veličina koje utiču na životni vijek transformatora.

6. ZAKLJUČAK

U radu su opisane metode mjerenja temperature transformatora i način njihove funkcionalne primjene. Takođe je prikazana struktura i koncept sistema temperaturnog monitoringa transformatora s pregledom senzora i mje-

stima njihove ugradnje. Urađena je i analiza mogućnosti njihove primjene na već postojeće transformatore u pogonu, kao i mogućnost primjene na nove transformatore.

Temperaturni monitoring transformatora je jedan od nabitnijih podsistema cjelokupnog sistema monitoringa. Temperaturnim monitoringom transformatora omogućava se pravovremeno djelovanje na sprečavanju uzročnika povišene temperature, a samim tim i na povećanje životne dobi transformatora.

Nastavak razvoja očekuje se na području novih mjernih metoda i senzora, kao poboljšanju postojećih, te nadogradnji sistema funkcijom automatizirane dijagnostike stanja transformatora.

LITERATURA

- [1] J-N. BÉRUBÉ, J. Aubin, W. Mc Dermind: *Recent development in transformer winding temperature determination*, Neoptix <http://www.neoptix.com/literature.asp>
- [2] J-N. BÉRUBÉ, B. L. Broweleit J. Aubin, *Optimum transformer cooling control with fiber optic temperature sensors*, Neoptix <http://www.neoptix.com/literature.asp>
- [3] <http://www.neoptix.com/> (NEOPTIX, Fiber optic temperature sensors)
- [4] www.lumasenseinc.com
- [5] O. Roizman, V. Davydov *Temperature rise test*, Spring 2009 IEEE Transformers Committee Meeting, Miami FL, 21 April 2009.
- [6] IEEE C57.91-1995: *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*
- [7] <http://www.reinhausen.com>
- [8] en.wikipedia.org/wiki/Resistance_thermometer

BIOGRAFIJA

Midhat (Šahin) Umihanić, rođen je 07.02.1984. godine u Tuzli, Bosna i Hercegovina. Diplomirao je na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli 2007. godine, i stekao stručno zvanje diplomirani inženjer elektrotehnike smjer - Tehnička informatika. Godine 2010. položio je stručni ispit iz oblasti elektrotehnike. Stalni je sudski vještak elektrotehničke struke Apelacionog suda Brčko Distrikta. Magistarski rad odbranio je na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli 2014. godine na Odsjeku za energetiku i stekao stručno zvanje magistar elektrotehnike. Trenutno je zaposlen u J.U. Mješovita srednja škola Živinice kao profesor elektrotehničke grupe predmeta. Oženjen je i otac jednog djeteta.

Vlado Madžarević rođen je 9. septembra 1953. godine u Tuzli, Bosna i Hercegovina. Magistrirao je i doktorirao 1987. g. i 1998. godine na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli. Boravio je na specijalističkom studiju, na Univerzitetu u Brnu, Republika Češka, 1989. godine, gdje je specijalizirao iz oblasti analiza elektromagnetnih polja kod sinhronih mašina. Trenutno radi kao redovni profesor na Fakultetu elektrotehnike Univerziteta u Tuzli, na predmetima vezanim za teoriju elektromagnetnih polja, dijagnostiku električnih mašina, EMC. Bio je uključen u veći broj domaćih i međunarodnih projekata. Autor je i koautor velikog broja radova i knjiga.