

Značaj određivanja temperature najtoplije tačke transformatora

Srđan Jokić, Nada Cincar

Elektrotehnički fakultet Istočno Sarajevo

Univerzitet u Istočnom Sarajevu

Istočno Sarajevo, R. Srpska, BiH

srđjan.jokic@etf.unssa.rs.ba, nada.cincar@etf.unssa.rs.ba

Petar Matić

Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Univerzitet u Banjoj Luci

Banja Luka, R. Srpska, BiH

pero@etfbl.net

Sadržaj— U radu je prikazan značaj poznavanja vrijednosti temperature najtoplije tačke i analiziran uticaj pretjeranog povećanja njene vrijednosti na radni vijek transformatora. Naveden je pregled direktnih i indirektnih metoda za određivanje vrijednosti temperature. Istražene su mogućnosti kontrolisanog preopterećenja transformatora unutar elektroenergetskog sistema sa aspekta graničnog porasta temperature. Takođe je izvedena temperaturna analiza rada jednog konkretnog suvog distributivnog transformatora.

Ključne riječi— transformatori; određivanje temperature; radni vijek transformatora; najtoplija tačka.

I. UVOD

Transformatori su jedan od najvažnijih dijelova elektroenergetskog sistema i svakodnevno su izloženi termičkim i elektrodinamičkim naprezanjima. U toku svog radnog vijeka često se mogu naći u uslovima kada su opterećeni iznad nazivnih vrijednosti struje. To se često dešava u slučajevima rekonfiguracije mreže, u vremenskim trenucima kada je jedan ili više ostalih elemenata unutar elektroenergetskog sistema isključen ili kada je transformator preopterećen usljed povećane potrošnje u sistemu. Ovo je naročito opasna situacija tokom ljetnog perioda kada se dešava i da je otežan rad sistema za hlađenje.

Rad transformatora sa preopterećenjem se često dozvoljava u kontrolisanim uslovima zasnovanim na kriterijumima elektroprivreda, opravdanim iz ekonomskih razloga i povećane raspoloživosti elemenata elektroenergetskog sistema. Sa druge strane, u uslovima postojanja konkurentskog tržišta, nastoje se smanjiti troškovi pogona i održavanja, a da se pri tome ne utiče na smanjenje raspoloživosti [1]. U novijem periodu transformatori se opterećuju iznad nazivnih parametara u uslovima kada postoje vršni momenti potrošnje, shodno preporukama međunarodnih standarda [2], [3]. Pri ovome se podrazumijeva da je transformator u periodima van vršnog opterećenja radio duže vrijeme u uslovima ispod nazivne snage.

Ograničavajući faktor planskog opterećenja transformatora je temperatura izolacionog sistema i namotaja transformatora i njen uticaj na degradaciju izolacije i skraćenje očekivanog radnog vijeka transformatora. Preopterećenje transformatora uzrokuje povećanje radne temperature namotaja i papirno-uljnog izolacionog sistema, čime dolazi do izražaja značaj

određivanja zakonitosti rasprostiranja toplote unutar transformatora, a posebno i određivanja najtoplije tačke unutar čitavog sistema, sastavljenog od magnetnog kola, namotaja i izolacije.

U poglavlju II ovog rada predstavljen je značaj poznavanja temperature transformatora. Navedene su osnovne kategorije njegovog planskog preopterećenja i procjena životnog vijeka izolacije i transformatora u cjelini. Treće poglavlje je posvećeno osnovnim tehnikama mjerenja temperature kod uljnih i suvih transformatora. U četvrtom poglavlju prikazana je temperaturna analiza rada konkretnog, suvog distributivnog transformatora. Analiza je izvedena na osnovu njegovog dnevnog dijagrama opterećenja i sa aspekta vremenske promjene temperature izolacije namotaja i jezgra. Pri tome su analizirane vrijednosti temperature najtoplije tačke čitavog transformatora. Prikazan je i geometrijski raspored temperature po fazama, zavisno od visine transformatora, pri dnevnom opterećenju.

II. ZNAČAJ POZNAVANJA VRIJEDNOSTI TEMPERATURE

A. Opterećenje transformatora

Uslovi rada transformatora, pored konfiguracije mreže i njenog stanja, uglavnom zavise od strategije elektroprivreda i spremnosti da se planski rizikuje smanjenje radnog vijeka transformatora usljed preopterećenja.

Shodno tome, planirana strategija opterećenja se uglavnom može klasifikovati u okviru četiri standardna tipa rada [2-3]:

1) Normalno očekivano opterećenje u toku radnog vijeka

Normalno očekivano opterećenje postoji u slučajevima kada je energetski transformator u uslovima rada u kojim je vrijednost temperature najtoplije tačke 98 °C za obični, odnosno 110 °C za termički usavršen izolacioni papir [4]. Moguće je da transformator kratkotrajno radi i iznad ovih vrijednosti, pri čemu je obezbijeđeno da je prije toga radio duži period sa vrijednostima ispod ovih granica.

2) Plansko preopterećenje

Plansko preopterećenje se očekuje u slučajevima kada se preopterećenje planira u specifičnim periodima, pri čemu se dostižu vrijednosti temperature najtoplije tačke do 130 °C. U ovom slučaju se očekuje skraćenje radnog vijeka transformatora pa se često rade analize prihvatljivog skraćenja radnog vijeka pojedinih jedinica.

3) Dugoročno preopterećenje

Dešava se obično u slučaju ispada nekih elemenata sistema i potiče usljed potrebe za održavanjem integriteta čitave prenosne mreže. Transformator je pri tome preopterećen duži period vremena, i do nekoliko mjeseci, čime se znatno skraćuje njegov radni vijek, a temperature dostižu i do 140 °C.

4) Kratkotrajno preopterećenje

Ovaj vid preopterećenja se dešava u slučajevima potrebe za održanjem sistema u stabilnom radu, podrazumijeva kratkotrajno, ali znatno veliko preopterećenje. Dešava se jedan do dva puta u toku normalnog radnog vijeka transformatora, pri čemu temperature ne smiju dostići vrijednosti veće od 180 °C

B. Procjena životnog vijeka transformatora

Pojam "životni vijek" transformatora se najčešće odnosi na pojam starenja njegove izolacije, a ne na ukupni radni vijek. Uzimajući u obzir da je u konstrukcijama energetskih transformatora uglavnom smanjen uticaj vlage i kiseonika, jedan od glavnih uticaja na starenje transformatora je uticaj temperature izolacionog sistema. Dozvoljene vrijednosti temperatura uljnih energetskih transformatora sa cvrstom izolacijom klase 105 °C, su definisane odgovarajućim standardima [2], [5], [6] i predstavljene su u Tabeli. I

TABELA I. DOZVOLJENE VRIJEDNOSTI TEMPERATURA

| Granične vrijednosti temperature | | |
|--|----------------|---------------------------|
| Prosječna vrijednost porasta temperature namotaja, -sistem hlađenja: ON, OF OD | 65 °C 70 °C | Iznad temperature okoline |
| Porast temperature najtoplije tačke | 78 °C | Iznad temperature okoline |
| Porast temperature vrha tečnosti | 60 °C | Iznad temperature okoline |
| Maksimalni porast temperature | 110 °C | Apsolutni porast |

Prema [2] za uobičajeni životni vijek transformatora se smatra vrijednost od 180 000 časova ili 20,55 godina. Skraćenje radnog vijeka izolacije se izražava matematički preko Arhenijusovog zakona starenja izolacije, prikazanog na Sl. 1 [7], koji je nelinearnog karaktera i predstavljen je jednačinom (1):

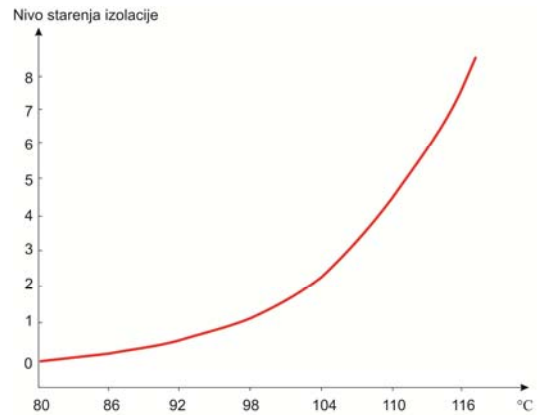
$$Life = e^{\left(\frac{A+B}{T}\right)}, \quad (1)$$

pri čemu su A i B konstante, dobijene eksperimentalnim putem, a T je apsolutna vrijednost temperature. U opsegu od 80 °C do 90 °C, u kome je i uobičajena vrijednost temperatura najtoplije tačke, ovaj zakon se često izražava i na drugačiji način, preko Montsingerove jednačine:

$$Life = e^{-p\theta}, \quad (2)$$

gdje je p konstanta, a θ temperatura u °C.

Veza temperature i očekivanog životnog vijeka transformatora predstavljena je faktorom starenja [8].



Slika 1. Arhenijusov zakon starenje izolacije

Za porast temperature od 65 °C, faktor se može izraziti u obliku jednačine:

$$F_{AA} = e^{\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273}\right)} [r.j.], \quad (3)$$

pri čemu je θ_H vrijednost temperature najtoplije tačke. Da bi se procijenio očekivani životni vijek izolacije, tj. transformatora, uobičajeni vijek transformatora se dijeli ovim faktorom.

III. MJERENJE TEMPERATURE TRANSFORMATORA

A. Transformatori izolovani uljem

Za podešavanje termičke zaštite energetskih transformatora najčešće se koriste tri vrijednosti temperature: temperatura okoline, temperatura gornjeg dijela ulja u transformatorskom kotlu i vrijednost temperature najtoplije tačke. Za dobijanje vrijednosti temperatura koriste se ili direktne metode mjerenja ili estimirane, tj računate vrijednosti gornjeg ulja i najtoplije tačke. Generalno gledano, cilj termičke zaštite je da se eliminiše negativni uticaj temperature najtoplije tačke na izolaciju namotaja transformatora pa je značaj određivanja temperature najtoplije tačke veoma veliki. Pri određivanju ovih vrijednosti primjenjuje se više tehnika, koje se zasnivaju na korištenju:

- termičkih senzora,
- standardizovanih proračuna,
- termičkih modela,
- računarskih simulacija,
- tehnika vještačke inteligencije.

1) Mjerenje pomoću termičkih senzora

Registrowanje temperature pomoću termičkih senzora u slučaju uljnih transformatora podrazumijeva postojanje senzora koji su direktno smješteni na namotaju ili u prostor između navojaka. Ovim bi se zahtijevala instalacija senzora tokom proizvodnje transformatora i smještanje u položaj u kojem bi vrijednosti temperatura bile najviše (Sl. 2).



Slika 2. Instalacija optičkih, termičkih senzora tokom proizvodnje [9]

2) Određivanje temperature na osnovu proračuna

Određivanje temperature na osnovu standardizovanih proračuna podrazumijeva korištenje formula prema standardima [3], [5]. Zasniva se na mjerenju temperature gornjeg ulja koje se može dobiti na osnovu testa zagrijavanja transformatora (engl. *Heat Run Test*) i ima sljedeći oblik:

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H, \quad (4)$$

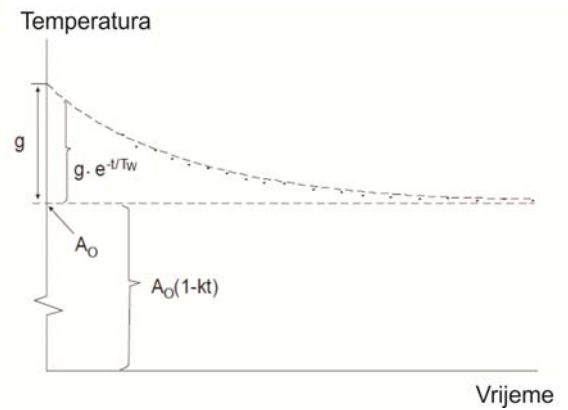
gdje je:

- θ_H - temperatura najtoplije tačke [°C],
- θ_A - temperatura okoline [°C],
- $\Delta\theta_{TO}$ - porast temperature gornjeg ulja iznad temperature okoline.
- $\Delta\theta_H$ - porast temperature najtoplije tačke iznad temperature gornjeg ulja.

Izvođenje testa zagrijavanja podrazumijeva mjerenje otpornosti namotaja nakon isključenja transformatora. Jedan od glavnih zahtjeva tokom ovog testa je ekstrapolacija vrijednosti otpornosti u funkciji vremena od momenta početka mjerenja otpornosti do momenta isključenja transformatora. Definisane funkcije promjene otpornosti, odnosno temperature sa sobom povlači uzimanje u obzir uticaja više činjenica:

- termičke konstante hlađenja namotaja i ulja,
- geometrijske raspodjele temperature namotaja [5], [10],
- eventualni uticaj sistema hlađenja nakon isključenja transformatora,
- Uticaj prvog korisnog rezultata mjerenja otpornosti od početka testa [11].

Tipičan izgled promjene srednje temperature namotaja transformatora sa uljnom izolacijom, tokom hlađenja, predstavljen je na Sl. 3. Prikazan je uticaj brže (eksponencijalne) promjene temperature, koja potiče usljed termičke konstante namotaja i sporije promjene, koja potiče usljed termičke konstante hlađenja ulja.



Slika 3. Promjena srednje temperature namotaja transformatora [5]

3) Termički modeli

Glavna ideja na kojoj se zasniva modelovanje u cilju određivanja prostiranja toplote i definisanja najtoplije tačke transformatora počiva na činjenici termičko-električne analogije. Ona podrazumijeva da se termički parametri kao što su prostiranje toplote, temperatura, skladištenje toplote i njeno rasipanje mogu dovesti u analogiju sa električnim parametrima, strujom, naponom, kapacitetom i otporom. Do sada su razvijeni različiti modeli na osnovu kojih bi se što vjerodostojnije opisalo termičko ponašanje transformatora, uzimajući u obzir uticaj različitih parametara na prostiranje toplote [7].

4) Računarske simulacije

Razvojem računarskih softvera sa većom ili manjom preciznošću je omogućeno da se simuliraju i termički procesi unutar transformatora. Simulacije pri tome omogućavaju rješavanje dvodimenzionalnih ili trodimenzionalnih problema korištenjem standardnih tehnika modelovanja kao što je metoda konačnih elemenata. Neki od programskih paketa koji omogućavaju ovakav vid modelovanja su FEA (engl. *Finite Element Analysis*) ili COMSOL.

5) Tehnike vještačke inteligencije

U modelovanju prostiranja toplote sve više dolaze do izražaja i tehnike vještačke inteligencije. Postoje brojna istraživanja koja koriste tehnike fazi-logike, genetskih algoritama i neuralnih mreža. Formiraju se modeli zasnovani na vještačkom učenju, koji počivaju na podacima sa realnih objekata posmatranja. Paralelno opisivanju zakona prostiranja toplote, razvijaju se različiti ekspertski sistemi i fazi-logički pristupi, kako bi se otkrile pojedine veze između procesa u transformatoru i njegovog stanja.

B. Suvi transformatori

Za razliku od transformatora izolovanih uljem, procjena životnog vijeka suvih transformatora se može definisati, na osnovu preporuka međunarodnog standarda IEC 60076-12 [12], sljedećim izrazom:

$$L = a \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (5)$$

pri čemu su: L očekivani životni vijek, a i b koeficijenti koji se određuju prema temperaturnim svojstvima izolacionog sistema, a T je temperatura izolacije u Kelvinima. Vrijednost

temperature najtoplije tačke suvih transformatora se izražava na osnovu proračuna, sljedećom relacijom:

$$\theta_{HS} = \theta_a + \Delta\theta_{HS}, \quad (6)$$

gdje je θ_a vrijednost temperature okoline, a $\Delta\theta_{HS}$ je temperaturni porast pri opterećenju I , izražen u Kelvinima. Za prirodno hlađene transformatore se može predstaviti jednačinom [12]:

$$\Delta\theta_{HS} = \Delta\theta_{HS,r} [I]^{2m}. \quad (7)$$

gdje $\theta_{HS,r}$ predstavlja temperaturu najtoplije tačke pri opterećenju 1,0 izraženo u relativnim jedinicama, a m empirijsku konstantu. Za transformatore sa forsiranim hlađenjem, u proračunu jednačine (7) se uzima u obzir i temperaturna korekcija za promjenu otpora u zavisnosti od temperature, kao i korekcija za sistem hlađenja.

Maksimalno dozvoljene vrijednosti za temperaturu izolacije i maksimalnu temperaturu unutar suvih transformatora, pri različitim stepenima izolacije su date u tabeli II:

TABELA II. MAKSIMALNE VRIJEDNOSTI TEMPERATURA SUVIH TRANSFORMATORA [12]

| Temperatura izolacionog sistema [°C] | Maksimalna temperatura najtoplije tačke [°C] |
|--------------------------------------|--|
| 105 (A) | 130 |
| 120 (E) | 145 |
| 130 (B) | 155 |
| 155 (F) | 180 |
| 180 (H) | 205 |
| 200 | 225 |
| 220 | 245 |

S obzirom da se sa povećanjem opterećenja povećava i tok rasipnog fluksa u konstruktivnim dijelovima transformatora, taj tok ima uticaj i na povećanje gubitaka u magnetnom kolu, što znatno povećava i temperaturu pa je to i jedno od glavnih ograničenja u normalnom pogonu. Pri tome se mora voditi računa da temperatura ovih dijelova ne prelazi vrijednosti navedene u Tabeli II.

IV. PRAKTIČNA ANALIZA RADA TRANSFORMATORA

U eksperimentalnom dijelu rada analizirane su temperaturne karakteristike distributivnog, suvog transformatora, kojim se napaja zgrada Elektrotehničkog fakulteta u Istočnom Sarajevu. S obzirom da je u zgradi, pored fakulteta, smješten i određeni broj institucija, zajedno sa Rektoratom Univerziteta u Istočnom Sarajevu, bilo je zanimljivo analizirati opterećenje u toku radnog dana, kada postoji i vršno opterećenje u zgradi. Pri posmatranoj vrijednosti struja u pojedinim fazama, snimana je temperaturna promjena unutar transformatora, kao i njena geometrijska raspodjela. Korištena je metoda beskontaktnog određivanja temperature, pomoću termovizijske kamere. Tehnički podaci analiziranog transformatora su dati u Tabeli III. Na Sl. 4 su prikazani testirani namotaji, unutar metalnog kućišta transformatora (pogled odozgo).

TABELA III. TEHNIČKI PODACI TRANSFORMATORA

| Parametar | vrijednost |
|---------------------------|--------------------|
| Nazivna snaga | 800 kVA |
| Prenosni odnos | 10.5/0.4 kV/kV |
| Nazivna vrijednost struja | 46.2/1154 A |
| Sprega | Dyn ^o 5 |
| Tip hlađenja | AN |
| Klasa izolacije | B |



Slika 4. Prikaz namotaja testiranog transformatora (pogled odozgo)

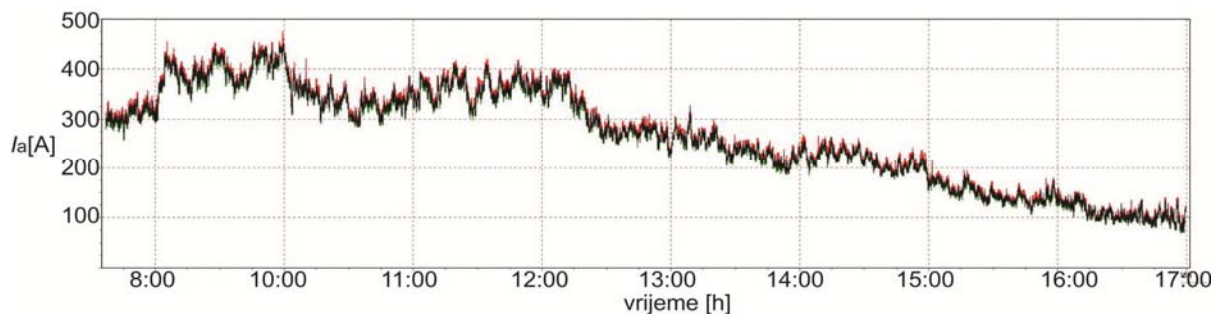
Ciljevi eksperimentalne analize su: određivanje vrijednosti temperature najtoplije tačke transformatora, određivanje karaktera promjene temperature sa opterećenjem tokom dana, mjerenje vrijednosti temperature izolacionih dijelova i metalnih dijelova konstrukcije, određivanje promjene temperature u zavisnosti od visine transformatora na pojedinim stubovima.

U eksperimentu je korištena sljedeća oprema:

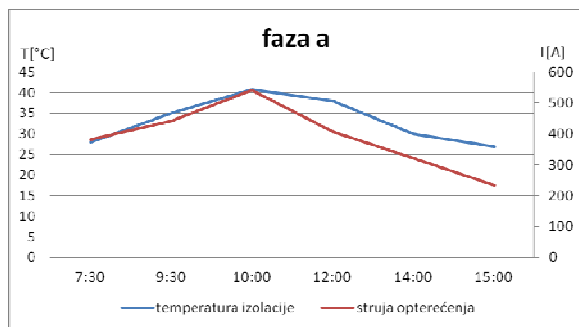
- termovizijska kamera, *Flir E50*, tačnosti $\pm 2^\circ\text{C}$,
- jednofazni analizator kvaliteta električne energije, *Fluke 145* sa softverom *Power Log*,
- strujna kliješta *Tecpel DPM-041*.

Opterećenje transformatora je registrovano tokom perioda od 7:30 časova, do 17:00 časova, u toku radnog dana. Mjerenje je izvedeno odbircima u intervalima od 5 sekundi. Profil opterećenja izvoda transformatora na sekundarnoj strani, u najviše opterećenoj fazi a, prikazan je na Sl. 5 Na dijagramu se uočava više registrovanih krivih, označenih različitim bojama, pri čemu su: crna - prosječna vrijednost u datom trenutku, crvena - maksimalna dostignuta vrijednost, zelena - minimalna vrijednost. Istovremeno su izvedena mjerenja struje opterećenja i temperature izolacije u svim fazama transformatora, u šest vremenskih trenutaka. Pri tome su registrovane vrijednosti temperature magnetnog jezgra. Temperatura izolacije i jezgra je analizirana u gornjem i donjem dijelu transformatora, koji su bili dostupni za mjerenje u pogonskom stanju transformatora, s obzirom na postojanje metalom oklopljenog dijela kućišta u sredini.

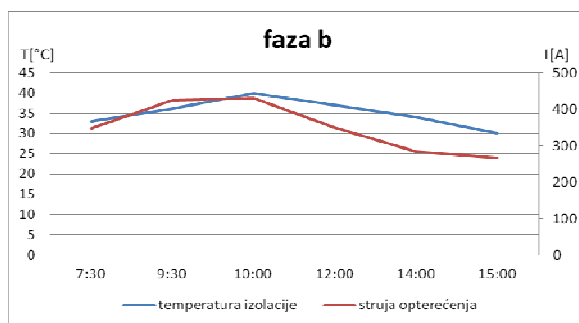
Na osnovu mjerenih rezultata, izvedena je analiza za svaki namotaj posebno. Na Sl. 6, 7 i 8 su prikazani dijagrami promjene struje opterećenja po fazama i promjena temperature gornjeg dijela izolacije namotaja u posmatranim vremenskim trenucima.



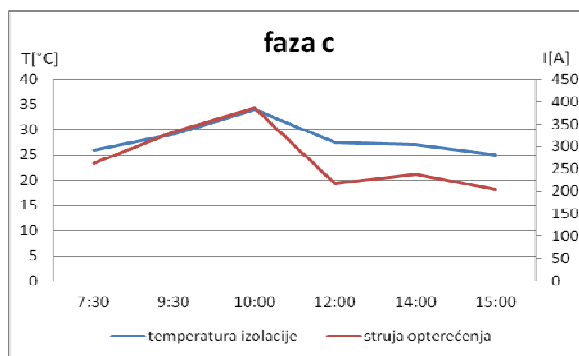
Slika 5. Struja opterećenja faze a posmatranog transformatora



Slika 6. Vremenska zavisnost temperature i struje u fazi a



Slika 7. Vremenska zavisnost temperature i struje u fazi b

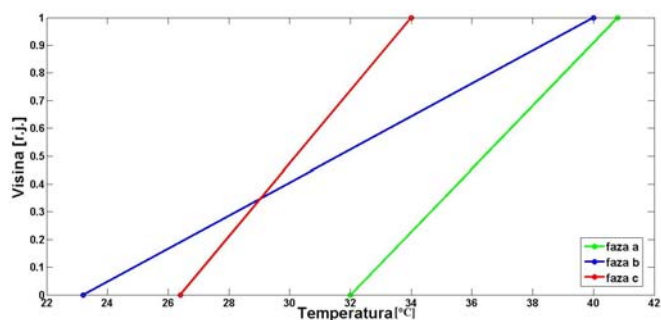


Slika 8. Vremenska zavisnost temperature i struje u fazi c

S obzirom da su temperature donjih dijelova izolacije sve tri faze bile niže u odnosu na gornje dijelove, promjene za ove tačke nisu bile interesantne za analizu zavisnosti od opterećenja.

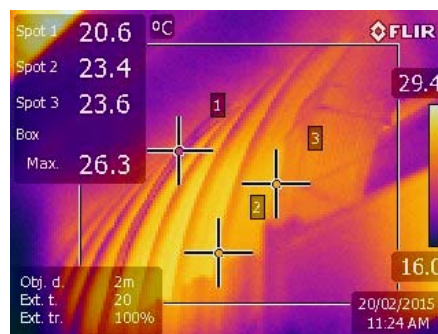
Najviše opterećena je bila faza a i maksimalna vrijednost struje opterećenja je iznosila 542 A, u 10:00 časova. Vrijednost temperature najtoplije tačke izolacije je pri tome 40.8 °C. Vrijednosti struja opterećenja u ostalim fazama imaju sličan trend promjene u vremenu. Temperatura namotaja svih faza se mijenja sa karakterom promjene opterećenja, shodno vremenskim, termičkim konstantama zagrijavanja i hlađenja namotaja.

Analizirana geometrijska raspodjela temperature izolacije sa visinom je prikazana na Sl. 9.



Slika 9. Raspodjela temperature po visini transformatora

Pokazuje se da temperatura izolacije raste sa visinom transformatora. U ovom slučaju, temperaturna promjena je najmanja na stubu sa fazom c. Sl. 10 prikazuje raspodjelu temperature na vrhu namotaja jedne od faza, snimljenu termovizijskom kamerom. Predstavljene su tri karakteristične vrijednosti temperature, označene na slici, pri čemu se uočava opisana geometrijska zavisnost promjene.



Slika 10. Mjerenje temperature na vrhu namotaja

Registrovane temperature gornjeg i donjeg dijela magnetnog jezgra transformatora, po pojedinim stubovima, su navedene u Tabeli IV.

TABELA IV. REGISTROVANE VRIJEDNOSTI TEMPERATURA MAGNETNOG KOLA PO FAZAMA

| Faza a | Faza b | Faza c | Struja [A] | Vrijeme |
|---------|--------|---------|------------|---------|
| 383 | 347 | 263 | Struja [A] | 7:30 |
| 97 °C | 87 °C | 84 °C | Gornji dio | |
| 71 °C | 64 °C | 64 °C | Donji dio | |
| 442 | 424 | 334 | Struja [A] | 9:30 |
| 98.6 °C | 103 °C | 89 °C | Gornji dio | |
| 74 °C | 67 °C | 63 °C | Donji dio | |
| 542 | 430 | 386 | Struja [A] | 10:00 |
| 99.1 °C | 109 °C | 90.5 °C | Gornji dio | |
| 74 °C | 77 °C | 64 °C | Donji dio | |
| 408 | 350 | 217 | Struja [A] | 12:00 |
| 98 °C | 93 °C | 87 °C | Gornji dio | |
| 73 °C | 60 °C | 65 °C | Donji dio | |

Pokazuje se da je najtoplija tačka smještena na srednjem stubu u gornjem dijelu magnetnog kola i njena temperatura je 109 °C. Položaj ove tačke zavisi od nivoa i karaktera opterećenja, kao i rasporeda po fazama. S obzirom na nazivnu vrijednost sekundarne struje od 1154 A, transformator u navedenom periodu nije bio preopterećen. Izolacija namotaja pripada klasi B, pa je na osnovu Tabele 2, prema [12], maksimalna dozvoljena temperatura izolacije 130 °C, a maksimalna dozvoljena temperatura najtoplije tačke 155 °C. Izmjerena vrijednost temperature ulazi u okvir dozvoljenih vrijednosti. Ova temperatura može biti ograničavajući faktor u pogledu dozvoljenog preopterećenja transformatora.

V. ZAKLJUČAK

Značaj poznavanja vrijednosti temperature energetske distributivnih transformatora je višestruk. Uzimajući u obzir prilike u kojima postoji sve veća tržišna konkurencija u proizvodnji i isporuci električne energije, javljaju se uslovi u kojima transformator često radi u režimu planskog, kratkoročnog ili dugoročnog preopterećenja. Pri tome je jedan od ključnih faktora za povećanje raspoloživosti elektroenergetskog sistema poznavanje vrijednosti temperature i mogućnost brzog reagovanja u situacijama havarijskog preopterećenja pojedinih transformatora.

Preterano povećanje temperature bitno utiče na starenje izolacionog sistema i skraćuje radnog vijeka izolacije i transformatora u cjelini. Procjena preostalog radnog vijeka se izvodi na osnovu poznatih temperatura najtoplije tačke ili gornjeg ulja kod uljnih transformatora, odnosno poznavanja temperatura najtoplije tačke izolacije i metalnih dijelova konstrukcije kod suvih transformatora.

Postoje različite tehnike određivanja i monitoringa temperature transformatora, koje se u načelu mogu podijeliti na direktne metode (kontaktne ili beskontaktne) ili indirektno metode koje se zasnivaju na proračunima, modelovanju, računarskim simulacijama ili formiranju algoritama vještačke inteligencije.

Analizom rada konkretnog transformatora pokazuje se da temperatura čvrste izolacije pojedinih faza prati trend promjene opterećenja, zavisno od vremenskih, termičkih konstanti namotaja. S obzirom na nivo opterećenja po fazama, vrijednosti temperatura su u okviru dozvoljenih granica za izolaciju i metalne dijelove konstrukcije. Najtoplija tačka se nalazi na središnjem stubu magnetnog kola, na šta, pored same konstrukcije, utiče i nivo rasipnog fluksa u jezgru transformatora.

LITERATURA

- [1] J. Perez, "Fundamental principles of transformer thermal loading and protection," 2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, Mar. 2010. [Online]. Dostupno: <http://dx.doi.org/10.1109/cpre.2010.5469518>
- [2] IEC Standard 60076-7, "Power Transformers, Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers", 2009.
- [3] IEEE Standard C57.12.90, "Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers", 2010.
- [4] Nawzad Rashid, "Short-time Overloading of Power Transformers", Master Thesis, Stockholm, Sweden, 2011.
- [5] IEC Standard 60076-2, "Power Transformers, Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers", 2011.
- [6] IEEE Standard 1538-2000, "IEEE Guide for Determination of Maximum Winding Temperature Rise in Liquid-Filled Transformers", 2000.
- [7] V. V. S. S. Haritha, T. R. Rao, A. Jain, and M. Ramamoorthy, "Thermal modeling of electrical utility transformer," 2009 International Conference on Power Systems, 2009. [Online]. Dostupno: <http://dx.doi.org/10.1109/icpws.2009.5442724>
- [8] R. Hunt, M. L. Giordano, "Thermal protection of transformers under overload conditions," Electrical Engineering, vol. 63, no. 6, pp. 444-446, Jun. 1944. [Online]. Dostupno: <http://dx.doi.org/10.1109/ee.1944.6440335>
- [9] S.P. Kennedy, T. Gordner, J.N. Berube, R. Ringlee, "Hot spot studies for sheet wound transformer windings", 80th International Conference of Doble Clinets, 2013.
- [10] M. K. Pradhan and T. S. Ramu, "Estimation of the Hottest Spot Temperature (HST) in Power Transformers Considering Thermal Inhomogeneity of the Windings," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1704-1712, Oct. 2004. [Online]. Dostupno: <http://dx.doi.org/10.1109/tpwr.2004.835291>
- [11] O. Roizman, V. Davydov, "Temperature rise tests", Spring 2009. IEEE Transformers Comitee Meeting, Miami FL, 21 April 2009.
- [12] IEC Standard 60076-12, "Power Transformers, Part 12: Loading guide for dry-type transformers", 2008.

ABSTRACT

This paper presents the importance of the transformer's hot spot temperature measuring and the influence of the excessive temperature rise to the service life of the transformer. An overview of direct and indirect methods for temperature determination is also presented. As a special case, the opportunities of regulated load of the transformer within the power system, from the aspect of maximum temperature rise are given. The paper also performed temperature analysis for the concrete dry-type, distribution transformer.

THE IMPORTANCE OF THE TRANSFORMER'S HOT SPOT TEMPERATURE DETERMINATION

Srdjan Jokic, Nada Cincar, Petar Matic