

## Izkušnje nadzora distribucijskih transformatorjev s pomočjo števec električne energije

ŽIGA HRIBAR<sup>1</sup>, BOŠTJAN FABJAN<sup>2</sup>, TIM GRADNIK<sup>3</sup>, BOŠTJAN PODHRAŠKI<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Elektro novi sistemi, d.o.o. Brnčičeva 17a, Ljubljana

<sup>2</sup>Meter ing., merilni inženiring, d.o.o., Tehnološki park 24, Ljubljana

<sup>3</sup>Elektroinštitut Milan Vidmar, Hajdrihova 2, Ljubljana

<sup>4</sup>Elektro Celje, Vrunčeva 2a, 3000 Celje

E-pošta: bostjan.fabjan@metering.si

**Povzetek:** Referat predstavlja izsledke pilotne uporabe standardnega industrijskega števca električne energije z dodatnimi tokovnimi senzorji in integriranim programskim modulom za diagnostiko termičnih stanj distribucijskih SN/NN transformatorjev do moči 1 MW (oziroma do 3000 A). Z namestitvijo naprednega števca, ki poteka brez odklopa transformatorja, smo z uporabo vgrajenega termičnega in električnega modela pridobili napetostni profil na primarni (SN) strani, podatke o obremenitvi posameznih faz in termično sliko transformatorja med obratovanjem.

Za potrebe postopnega uvajanja preventivnih metod vzdrževanja osnovne distribucijske infrastrukture smo na osnovi terenskih meritev analizirali točnost in uporabno vrednost vgrajenega termičnega modela, ki omogoča simulacijo temperature olja in oceno izrabe življenjske dobe v realnem času.

S pomočjo električnega modela smo ugotavljali izgube delovne in jalove energije v transformatorju, napetostni profil na primarni (SN) strani pa tudi dodatne možnosti ugotavljanja kraj električne energije s strani končnih uporabnikov NN omrežja.

Ključne besede: nadzor distribucijskih transformatorjev, vzdrževanje distribucijske infrastrukture, izgube transformatorja, izračun stopnje staranje transformatorja, električni števec

## Experiences of control of distribution transformers by using electricity meters

**Abstract:** This report presents the results of the pilot use of a standard industrial electrical energy meter with additional current sensors and an integrated program module for diagnosing the thermal distribution states of the MV / LV transformers with the power of up to 1 MW (or up to 3000 A). With the installation of advanced meter, which is done without disconnecting the transformer, we obtained voltage profile on the primary (SN) side, the data of load of individual phases and the thermal image of the transformer during operation. All this has been done using a built-in thermal and electrical model.

For the purposes of the gradual introduction of preventive maintenance methods of the basic distribution infrastructure we analyzed, based on field measurements, the accuracy and practical value of embedded thermal model, which allows the simulation of oil temperature and the calculation of a lifetime of transformer in real time.

With the help of an electric model we were determining the losses of active and reactive energy in the transformer, voltage profile in the primary (SN) sites, as well as the additional possibility of determining thefts of electricity by end users of LV network.

Keywords: distribution transformer monitoring, maintenance of distribution infrastructure, losses in the transformer, calculation of the ageing rate of the transformer, electricity meter

## 1 UVOD

Energetski transformatorji so eden pomembnejših elementov v elektroenergetskem sistemu. Da bi povečali zanesljivost in učinkovitost transformatorjev ter zmanjšali verjetnost nepredvidenih okvar se v svetu že dolgo uporabljajo različne metode nadzora, diagnostike in načrtovanja življenjske dobe transformatorjev. Metode so preizkušene in se množično uporabljajo na energetskem transformatorju v prenosu, kjer se pretaka veliko energije in imajo napake lahko zelo kritične posledice.

Z uvajanjem pametnih omrežij in novih informacijskih tehnologij se zanesljivost dobave električne energije zvišuje ter s tem nadzor ter diagnostika nad stanjem transformatorjev počasi prehaja tudi v distribucijska omrežja.

Faktor, ki najbolj vpliva na življenjsko dobo transformatorjev je staranje papirne in oljne izolacije navitij zaradi segrevanja, ki je neposredno odvisno od tokovne obremenitve navitij in temperature okolice. Temperatura transformatorja je tudi parameter, ki določa dovoljeni obseg preobremenjevanja nad deklarirano (nazivno) močjo transformatorja, t.j. dinamično mejno moč transformatorja.

V članku predstavljamo rešitev termičnega nadzora SN/NN distribucijskega transformatorja, ki je integrirana v standardnem industrijskem števcu električne energije Itron SL7000 DTM (Distribution Transformer Monitoring).

Učinkovit termični nadzor transformatorja temelji na natančnem termičnem modelu, ki nam podaja temperaturni profil transformatorja z visoko točnostjo. Glavna obratovalna faktorja, ki določata življenjsko dobo transformatorja sta temperatura navitij in temperatura olja, kot neposredna posledica tokovne obremenitve in temperatura okolice. Obstoječe rešitve za termični nadzor velikih energetskih transformatorjev omogočajo kvaliteten vpogled v termično stanje transformatorja, vendar množična uporaba tovrstnih tehnologij ekonomsko in tehnološko ni upravičena. Nadzor obsežnejšega sistema transformatorjev, kot je v primeru distribucijskega omrežja, zahteva množično vgrajevanje senzorjev, večja tveganja pri naknadnih posegih v notranjost obstoječih transformatorjev in odklope napajanja porabnikov zaradi elektro montažnih del. Vse to predstavlja strošek investicij, ki se danes v distribuciji kažejo kot nerentabilne. Članek predstavlja cenovno ugodno rešitev, ki ne zahteva nobenih posegov v transformatorsko postajo, kjer so danes že povsod števcu EE in zagotavljamo zadosti natančen termični model transformatorja, da lahko na osnovi daljinsko pridobljenih podatkov ocenjujemo njegovo stanje.

## 2 MERITVE ELEKTRIČNIH PARAMETROV IN TEMPERATURE

Industrijski števec Itron SL7000 DTM je izvedenka standardnega industrijskega števca električne energije, ki ustreza zahtevam slovenskih distribucij in je uvrščen v nabor merilne opreme. Števec beleži vse električne parametre in kazalce kvalitete napetosti skladno ter omogoča običajno daljinsko komunikacijo. Namesto običajnih notranjih tokovnih merilnih transformatorjev se kot merilni členi se v tej izvedenki uporabljajo galvansko ločene zunanje tokovne klešče na osnovi tuljave Rogowskega. Tovrstna rešitev nam omogoča enostavno, začasno ali stalno vgradnjo števca električne energije na zbiralke transformatorja tudi pod napetostjo brez prekinitev napajanja. Celotna namestitvev je lahko opravljena v manj kot 30ih minutah.



Slika 1: Prikaz namestitve števcu Itron SL7000 DTM s tokovnimi senzorji

Števec v širokem frekvenčnem območju in amplitudnem območju toka od 300 do 3000A zagotavlja merilno negotovost pod 1%. Rešitev predstavlja točnejšo merilno shemo kot je klasično zaporedno merilno vezje električnega števcu  $r=0,5\%$  in tokovnih merilnih transformatorjev  $r=2\%$ .

Na števcu so namensko uporabljeni dodatni analogni vhodi, ki so običajno namenjeni za podrejene števcne meritve drugih energentov. V naši izvedbi se uporabljajo za zajem temperature olja preko Pt100 sond. Tako lahko dodatno merimo temperaturo kotla, navitij in temperaturo okolice.

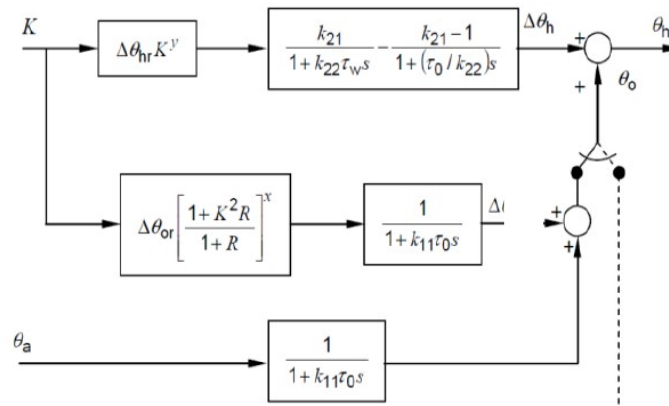
Na tovrsten način lahko na cenovno ugoden način, brez večjih posegov vgradnje temperaturnih sond v notranjost transformatorja, pridobimo dovolj točne merilne podatke, ki jih na osnovi obstoječe števcne tehnologije daljinsko posredujemo v center. Na osnovi termičnega modela transformatorja in simulacije temperaturnega profila transformatorja lahko spremljamo stanje transformatorja, planiramo vzdrževanje in napovedujemo njegovo življenjsko dobo.

### 3 DINAMIČNI TERMIČNI MODEL TRANSFORMATORJA PO IEC 60076-7

Metoda dinamičnega izračuna temperaturnega profila v števcu temelji na standardnem dinamičnem termičnem modelu IEC 60076-7. Termični model za izračun časovnih potekov temperatur v transformatorju uporablja diferencialne enačbe segrevanja, pri čemer sta uporabljena dva variabilna vhodna parametra, t.j. bremenski faktor transformatorja  $K$  in temperatura okolice  $\theta_a$ .

Na sliki 2 je prikazana blokovna shema termičnega modela. V modelu so uporabljeni naslednji termični parametri transformatorja:

- $\Delta\theta_{hr}$  - temperaturna razlika med oljem zgoraj in najtoplejšo točko pri nazivni obremenitvi
- $y$  - faktor konvekcije navitij,
- $\Delta\theta_{or}$  - temperaturna razlika med oljem in okolico pri nazivni obremenitvi
- $x$  - faktor konvekcije olja,
- $R$  - razmerje med izgubami pri nazivni obremenitvi in izgubami prostega teka
- $k_{11}, k_{21}, k_{22}$  konstante termičnega prenehaja modela,
- $\tau_w$  in  $\tau_0$  - časovne konstante navitij in olja;



Slika 2: Blokovna shema IEC 60076-7 termičnega modela

Primer nabora termičnih parametrov distribucijskega transformatorja je podan v tabeli 1.

Tabela 1: Priporočeni termični parametri po standardu IEC 60076-7 transformatorja ONAN (oljno hlajeni transformator z naravnim hlajenjem preko radiatorjev).

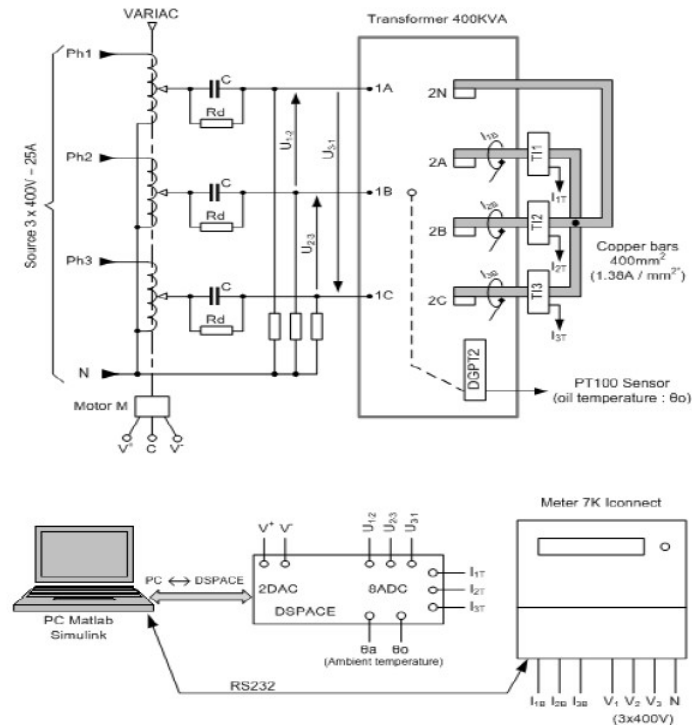
Parametri	Distribucijski transformator
x	0,8
R	6,5
$\tau_0$ (min)	180
$\tau_w$ (min)	4
$\Delta\theta_{or}$	55
$\Delta\theta_{hr}$	19
y	1,6
$k_{11}$	1
$k_{21}$	1
$k_{22}$	2

Rezultat modela IEC 60076-7 predstavljata temperatura olja in temperatura najtoplejše točke navitjih.

### 3.1

#### 3.1 Laboratorijsko preverjanje ustreznosti IEC termičnega modela in kalibracija parametrov termičnega modela na transformatorjih 160 do 800kV<sup>A</sup>

Izvedeno je bilo laboratorijsko preverjanje distribucijskih transformatorjev izvedb hlajenja ONAN, ki so brez prisilnega hlajenja olja in zraka v prostoru moči 160, 400, 800kVA; Vsi preskusi so bili izvedeni pri kratko sklenjenih sekundarnih sponkah. Vsak transformator je opremljen z sondo Pt100 nameščeno 10cm pod vrhom oljnega rezervoarja, kar nam podaja temperaturo olja. Na SN priključnih sponkah transformatorja je vezan avtotransformator z motornim pogonom z namenom regulacije toka oz. nastavitve bremenskega faktorja transformatorja K. Električni števec (ITRON SL7000 DTM) meri fazne tokove na NN strani transformatorja (slika 3). Računalnik, opremljen s simulacijskim programom Matlab/Simulink zajema meritve sekundarnih tokov, primarnih napetosti in temperature okolice na razdalji 2m od transformatorja ter temperaturo olja, izmerjeno s Pt100 sondo.

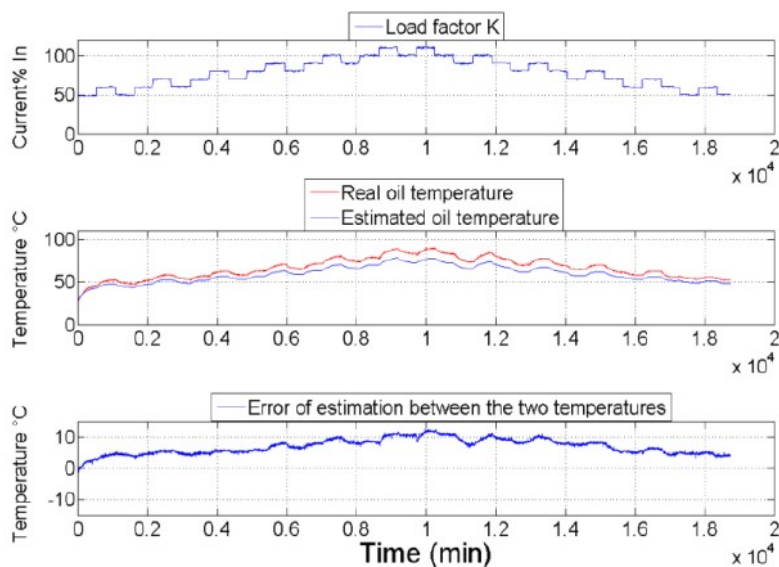


Slika 3: Shema priključitve transformatorja in števca v merilni sistem

### Kalibracija parametrov termičnega modela

V okviru laboratorijskega preverjanja sta bila izmerjena dva variabilna vhodna parametra, faktor obremenitve transformatorja  $K$  in temperatura okolice in en izhodni podatek, temperatura olja v transformatorju. Predstavljen matematični model na sliki 2 je bil simuliran s programskim paketom Matlab/Simulink, ki omogoča simulacijo temperature olja in točke najvišje temperature v transformatorju. S tem je bila preverjena ustreznost izbire priporočenih termičnih parametrov po IEC standardu in njihova ponovljivost na modelih transformatorjev različnih moči.

Izvedeni so bili večkratni preizkusi s segrevanjem po različnih obremenitvenih krivuljah in dvo tedenski test s spremembo faktorja bremena transformatorja v korakih  $\pm 10\%$  nazivnega bremena, ki je prikazan na sliki 4.



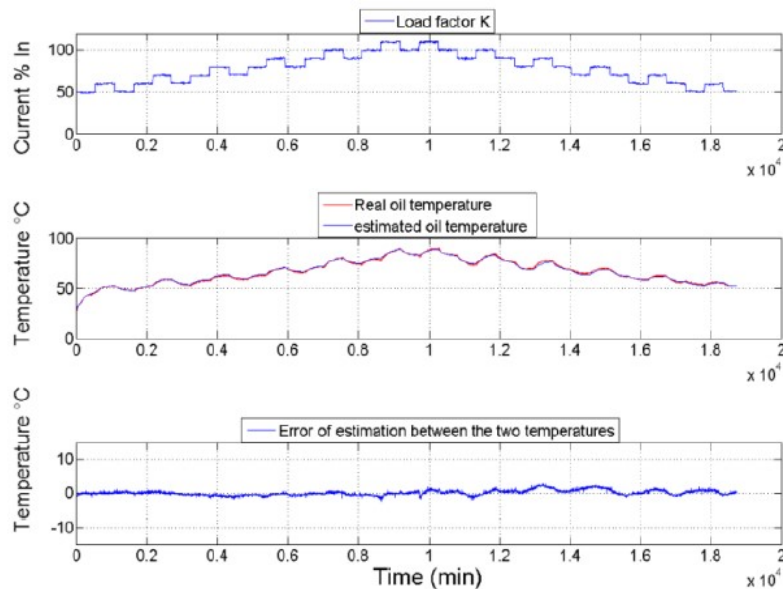
Slika 4: Merjena in določena temperatura olja 400kVA transformatorja z uporabo standardnih IEC termičnih parametrov.

Na osnovi meritev je bilo analizirana razlika med izmerjenimi temperaturami olja in temperaturami simuliranimi z standardno parametriranim IEC termičnim modelom, ki je dosegalo maksimalne vrednosti odstopanja do 12°C.

Glede na opažena odstopanja so bili podani zaključki, da uporaba generičnih termičnih parametrov, ki jih priporoča standard, ne daje dovolj natančnih rezultatov za nadzor termičnega stanja različnih tipov transformatorjev. Da bi znižali ta odstopanja, je potrebno individualno prilagoditi uporabljene termične parametre, za vsak tip oz. moč distribucijskega transformatorja.

### 3.2 Določanje termičnih parametrov transformatorja z algoritmom Levenberg-Marquardt.

Kot najboljša rešitev za izbiro transformatorju specifičnih termičnih parametrov je bil izbran Levenberg-Marquardt (LM) optimizacijski algoritem. Uporabljena je bila numerična nelinearna metoda najmanjših kvadratov, s katero so bili z večkratnimi iteracijami prilagojeni standardni parametri individualno za vsak tip transformatorja, ki so približale odziv IEC modela realnim izmerjenim vrednostim temperature olja. Na ta način so bila odstopanja med laboratorijskimi meritvami in simulacijami temperatur olja znižana na 3 °C. Odstopanje modela od realnega stanja je prikazano na sliki 5.



Slika 5: Merjena in ustanovljena temperatura olja pri uporabi LM metode za nastavitev parametrov transformatorja.

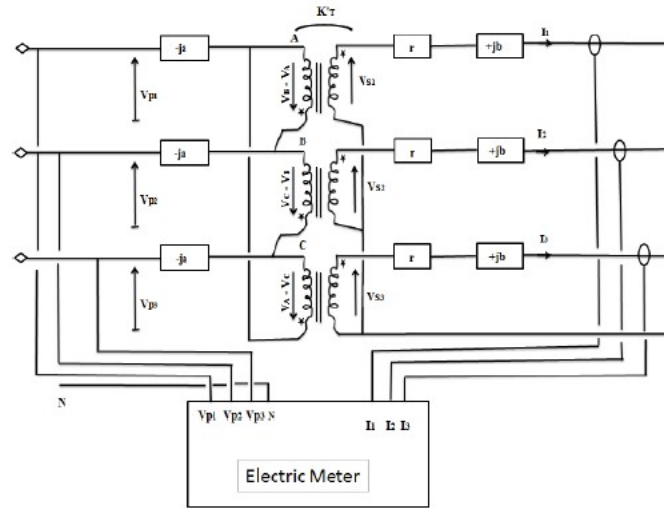
Parametri, ki so tako merjeni, usklajeni in realno upoštevani v programski opre mi so opisani v tabeli 2. Skladno z različnimi tipi transformatorjev so bila izdelana navodila za parametriranje glede na vrsto tip in moč transformatorja, da dosežemo zahtevano točnost termičnega modela transformatorja.

Tabela 2: Prilagojeni parametri modela transformatorja naši merilni metodi.

Parametri	Distribucijski transformator
X	0,61
R	8,89
$\tau_0$ (min)	140
$\Delta\theta_{or}$	56,82

#### 4. ELEKTRIČNI MODEL TRANSFORMATORJA

Električni model transformatorja, ki se uporablja za izračun vrednosti na SN strani temelji na Kappovem modelu in diagramu transformatorja. Magnetilna admitanca je upoštevana na primarni strani vzporedno s primarnim navitjem in s skupno stresano impedanco na nizkonapetostni strani zaporedno z NN navitjem.

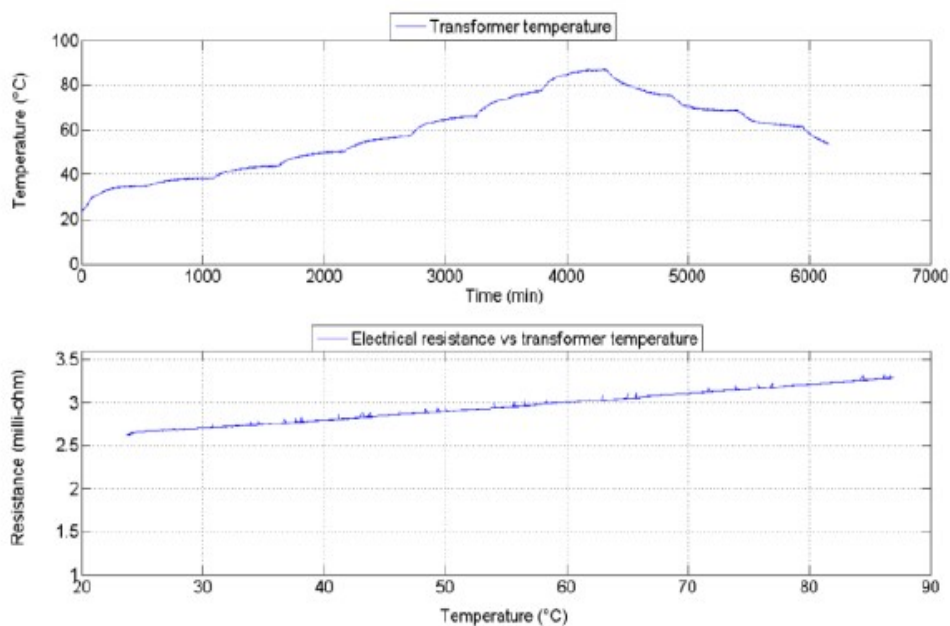


Slika 6: Električni model za določitev električnih parametrov.

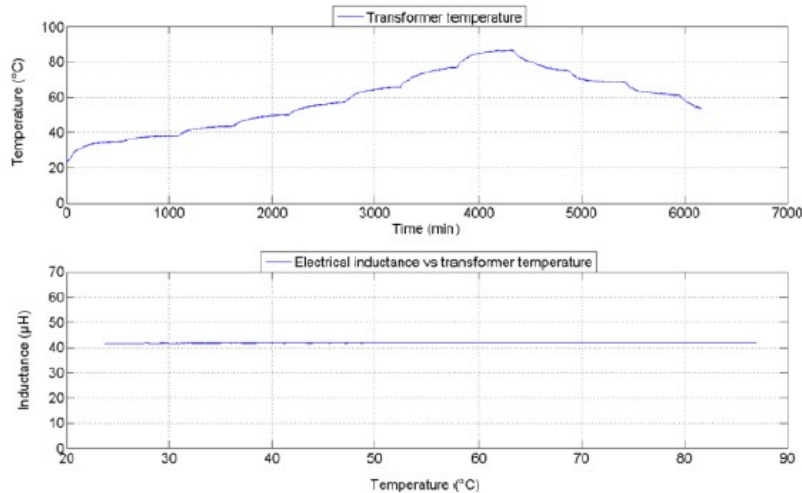
$$r_{1,2,3} = \frac{-1}{2K_T^2 I_{1,2,3}^2} (\sqrt{3}P_{1,2,3} + Q_{1,2,3}) \quad (1)$$

$$Ls_{1,2,3} = \frac{1}{2\omega K_T^2 I_{1,2,3}^2} (P_{1,2,3} - \sqrt{3}Q_{1,2,3}) + \frac{1}{K_T^2 C \omega^2} \quad (2)$$

Enačbe (1) in (2) nam opisujejo uhajave impedančne elemente kot funkcijo aktivne in reaktivnih vrednosti ter primerjavo z merjenimi vrednostmi moči z elektronskim števcem. Različne spremembe električnih elementov lahko opišemo, kot funkcijo temperature olja transformatorja.



Slika 7: Električna upornost v odvisnosti od temperature olja.

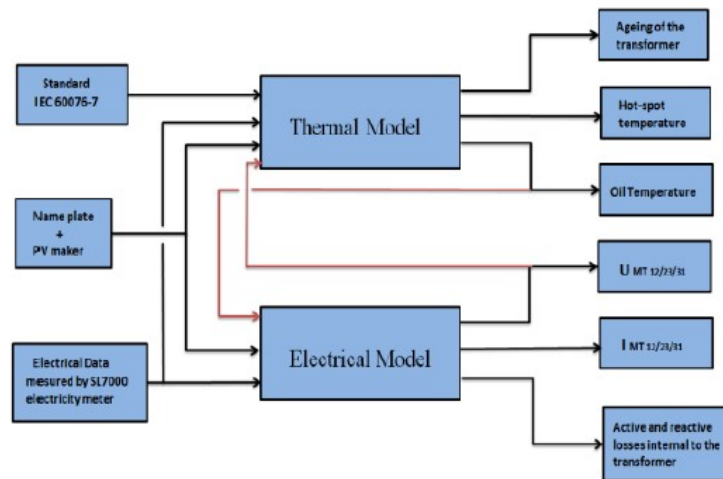


Slika 8: Induktanca v odvisnosti od temperature olja.

Skladno s pričakovanji sta stresana induktanca in napetostni nivo praktično neodvisna od temperature olja. Komponenta upornosti uhajave impedance pa sovpada z upornostjo navitij in predstavlja linearno funkcijo, ki sledi temperaturi olja. Poznana referenčna točka je podana pri temperaturi 75°C.

### 5. ZDRUŽEN ELEKTRIČNI IN TEMPERATURNI MODEL

V števcu izračun oz. simulacija električnega in temperaturnega modela potekata simultano. Izhod iz enega modela predstavlja vhodne podatke za drug model. Tako so SN napetosti vhodni podatek za termični model in temperatura olja kot vstopni podatek za električni model.



Slika 9: Blokovna shema združenega modela.

Vstopni parametri so: podatki iz IEC60076-7, podatki iz napisne tablice transformatorja in podatki transformatorja iz merilnega lista proizvajalca. Električni podatki se merijo z elektronskim števcem na NN strani transformatorja. Izhodni podatki termičnega modela so:

- Izračunana temperatura najtoplejše točke
- Izračunana temperatura olja
- Koefficient relativne hitrosti staranja

Izhodni podatki iz električnega modela so:

- Skupne notranje delavne in jalove izgube transformatorja
- SN napetosti in SN tokovi



## 6. IZKUŠNJE UPORABE ŠTEVCEV EE Z DOGRAJENO FUNKCIJO DIAGNOSTIKE TRANSFORMATORJEV NA OBMOČJU ELEKTOR CELJA

Meritve smo izvajali z elektronskimi števci Itron SL7000 DTM na dveh distribucijskih transformatorjih s hladilnim sistemom ONAN. Temperaturne sonde za merjenje temperature olja in okolice so bile vgrajene na transformator skladno z navodili proizvajalca, brez odklopa transformatorja. Merili smo električne veličine na nizkonapetostni strani in temperaturo okolice in rezervoarja transformatorskega olja. Kot referenčne meritve smo izvajali vzporedne meritve temperature kotla z referenčnim merilnikom temperature in termografsko kamero.

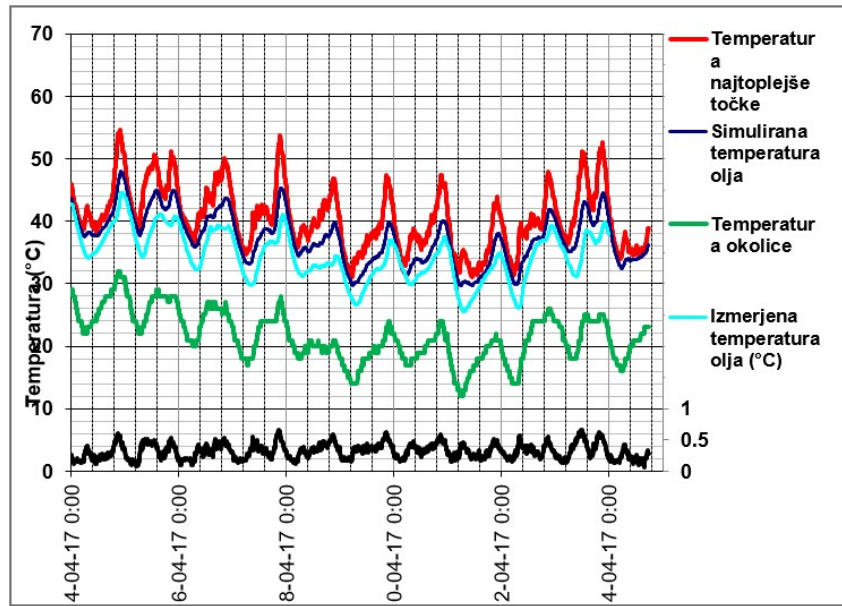


Slika 10: Priključitev merilnih členov na transformator



Slika 11. Vzporedno merjenje pretokov energije z obstoječim števcem električne energije

Merili smo standardne električne parametre transformatorske postaje in z uporabo termičnega modela nadzirali stanje transformatorja. Dobljene rezultate za termični model smo primerjali s simulacijo IEC modela za tovrsten transformatorje, direktno merjenje temperature z drugimi temperaturnimi senzorji. Dobljene električne rezultate smo primerjali z vgrajenim v TP kontrolnim števcem EE.



Slika 12: xxx

Meritve so pokazale, da pri merjenju temperature okolice blizu transformatorja model v preskušani napravi sledi standardnemu modelu po standardu IEC 60076-7.

Odstopanja merjene temperature olja od dejanske so bila do 5°C. Razlog je bil v meritvah okolice na površini kotla. Ne glede na to, model izvaja svoje izračune v skladu z pričakovanji in za način merjenja je potrebno ustrezno nastaviti vhodne parametre v napravi.

Stanje transformatorjev smo lahko spremljali v realnem stanju preko aplikacije v spletu.

Za pomembne kazalce, kot so nesimetrija, napetosti, konične moči in pregrevanje smo nastavili alarme, da nas opozarjajo na nevarna stanja. Ker je bil merjeni transformator obremenjen do 30% nazivne moči nismo v času preskušanja zaznali nobenih alarmov in povišanega nivoja staranja transformatorjev.

## 7. ZAKLJUČKI

1. Preskušana naprava je primerna kot kontrolni industrijski števec za TP
2. Preskušeni termični model naprave je bil preizkušen in daje podobne rezultate kot druge primerljive metode.
3. Omogočen imamo stalen daljinski nadzor nad obremenitvami in stanjem transformatorjev.
4. Uporabno sredstvo za nadzor problematičnih TP, kjer so transformatorji zaprti v ohišjih, izpostavljenem soncu in nimajo prisilnega hlajenja.
5. Že implementirana števčna rešitev v GIS omogoča enostavno uvedbo v delovanje.
6. Način priklopa omogoča začasne nadzore problematičnih TP brez odklopov in posegov v delovanje v sistem.
7. Uporabna rešitev za nadzor transformatorjev, ki morajo biti zaradi različnih vzrokov v omrežju določen čas izpostavljeni preobremenitvam.

## REFERENCE

- [1] S, Najar, J.F. Francis, E. Etien, S. Cauet, »Soft sensor for distribution transformers: thermal and electrical models.«, 23th International Conference on Electricity Distribution CIRED, Lion 15-18 June 2015, Paper 0419
- [2] IEC 60076-7:2005 Power transformers – part 7: Loading guide for oil immersed power transformers
- [3] T. Gradnik, D. Susa, P. Picher » In service accuracy evaluation of transformer Loadig guide models« 2012 CIGRE Canada Conference, 24-26 September 2012 Montreal
- [4] T. Gradnik, M. Končan-Gradnik: A rectifier transformer ageing study using optical fibre temperature sensors, transformer thermal modelling and EiMV physical-chemical diagnostics, Proceedings CIGRE Joint Colloquium A2/D1 Bruges, Cigre 2007