

Zagrevanje kompaktne kiosk transformatorske stanice

Milica Jevtić, Zoran Radaković

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

radakovic@etf.bg.ac.rs / Bulevar kralja Aleksandra 73

Sažetak—U radu se razmatra zagrevanje kompaktne transformatorske stanice (TS) 11 kV/0.4 kV u realnim eksploatacionim uslovima, pri radu na mreži, pri promenljivom opterećenju, temperaturi ambijenta, smeru i brzini vetra i sunčevom zračenju. Izvorišta toplote su gubici u samom transformatoru i sunčevo zračenje. Akumulisana toplota postoji kako u transformatoru, tako i u kiosku, gde je mnogo manja. Odvođenje toplote se vrši prirodnim strujanjem vazduha i zračenjem (provođenje je malo). Rad prikazuje odnos snaga gubitaka u transformatoru i zagrevanja od sunca za situaciju pri kojoj su izvršena merenja, a zatim su izvršene i simulacije hipotetičkih situacija nominalnog opterećenja i odsustva senki.

Ključne riječi- kompaktna kiosk transformatorska stanica, dinamički termički model, uljni transformator, opterećivanje transformatora; (Compact kiosk transformer substation, dynamic thermal model, oil-immersed power transformer, transformer loading)

I. UVOD

Poznato je da usled postojanja gubitaka energije kao posledice proticanja struje kroz namotaje i postojanja magnetnog fluksa u magnetnom kolu dolazi do zagrevanja transformatora. Porast temperature izolacionog sistema (čvrste izolacije i ulja) izaziva ubrzanje starenja izolacije i skraćenje životnog veka transformatora. Ovo je opšte poznato i razmatrano je u stručnoj literaturi, a specificirano je i u standardima – na primer [1] i [2]. Transformator po pravilu radi u uslovima promenljivog opterećenja i ambijentalnih uslova, zbog čega mu se menja i temperatura u toku vremena. Poznavanje ove vremenske promene je potrebno zbog niza praktičnih aspekata, od planiranja rekonstrukcija, preko zaštite, nadzora rada transformatora, upravljanja mrežom, upravljanja maksimumom potrošnje, itd.

Najveći istraživački napor su uloženi u proučavanja termičkih procesa unutar suda transformatora. Da bi se došlo do temperature u kritičnim tačkama transformatora, potrebno je dinamički termički model proširiti i na prostor u kome je smešten transformator. Zbog prelaska toplote sa transformatora ovaj prostor se zagreva i projektovanje njegovog hlađenja predstavlja neophodan deo kompletnog projekta TS. Tu se pre svega misli na projektovanje ventilacionih žaluzina, odnosno otvora za ulazak spoljnog hladnog vazduha i izlazak zagrejanog vazduha, kao i na porast temperature vazduha, u odnosu na spoljašnji ambijentalni vazduh, unutar odeljka sa transformatorom.

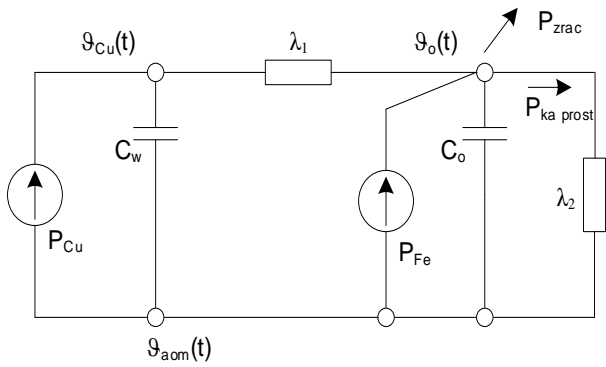
U gradskim prostorima postoji hroničan nedostatak prostora za smeštaj elektro-distributivnih TS, samim tim i njegova cena je visoka, zbog čega se sve više koriste ukopane TS, kod kojih ventilacija prirodnim strujanjem vazduha postaje specifična i dobija dodatno na značaju.

Tema našeg interesovanja su kompaktne kiosk transformatorske stanice, čija je osnovna prednost mogućnost jednostavnog i brzog postavljanja na bilo kojoj lokaciji. U toku prethodnog rada [3], razvijen je dinamički termički model ovakve TS baziran na modelu kretanja vazduha unutar prostorije usled termosifonskog efekta. Model je primenjivan i testiran za slučaj ispitivanja ovakve TS postavljene u ispitnoj fabričkoj stanici. Eksperimenti i merenja su vršeni sa osnovnim ciljem optimizacije ventilacionih otvora u TS nominalne snage 500 kVA. Koliko nam je poznato, u literaturi ne postoji model zasnovan na principima prikazanim u [3], ali je ostalo nekoliko pitanja za detaljnije proučavanje, posle čega su moguća proširenja i poboljšanja modela. U tom cilju, izvršeni su CFD (Computational Fluid Dynamics) proračuni, čiji su rezultati objavljeni u [4]. U [3] je planiran test modela u stvarnim eksploatacionim uslovima, rad na mreži i TS postavljena na otvorenom, sa uticajem realnih ambijentalnih uslova (vetar i sunce). Ovakva merenja su sprovedena na TS snage 200 kVA. U toku je priprema publikacije sa rezultatima testiranja modela na ovom primeru i sa izvesnom proširenjima modela u odnosu na [3], jer su tokom testiranja modela, uočena neka nova termička stanja, prevashodno uticaj intenziteta sunčevog zračenja na smer kretanja vazduha uz unutrašnju stranu zidova kioska.

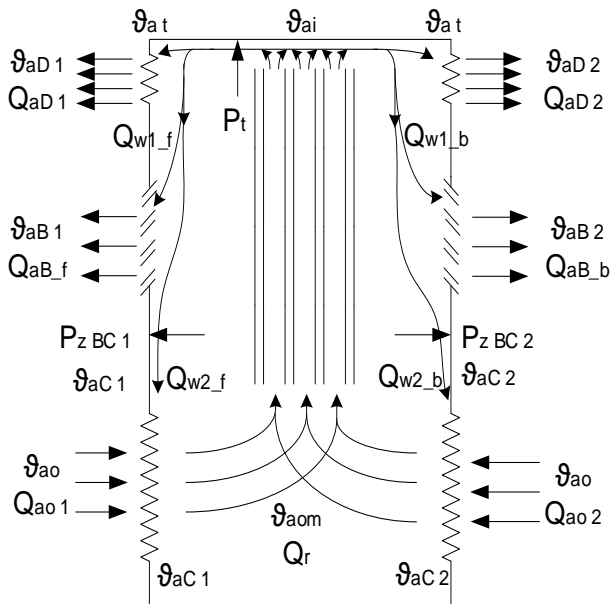
U ovom radu je dat pregled komponenti energetskog bilansa koje doprinose zagrevanju kompaktne transformatorske stanice. Cilj rada nije testiranje modela, niti objašnjavanje detalja modela, već sagledavanje osnovnog toka prenosa toplote, od mesta njenog generisanja, do mesta odvođenja u okolinu.

II. UKRATKO O TERMIČKOM MODELU

Na Sl. 1 je prikazana toplotna šema transformatora. Temperatura ϑ_{aom} predstavlja temperaturu vazduha na ulasku (na dnu) u radiator. Ona se određuje iz dela termičkog modela koji se odnosi na prostoriju i koji je prikazan na Sl. 2.



Slika 1. Toplotna šema transformatora

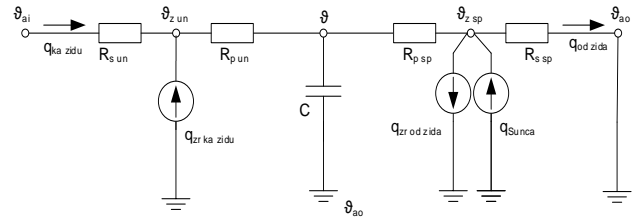


Slika 2. Smerovi kretanja vazduha unutar kioska

Snage razmene energije sa svakom od površi kioska (delovi zidova, tavanica) se određuju rešavanjem toplotne šeme prikazane na Sl. 3, gde zbir komponenti q_{zr} ka zidu odgovara snazi P_{zrac} na Sl. 2 (na Sl. 2 su prikazane samo snage na prednjoj – $P_{z BC 1}$, zadnjoj – $P_{z BC 2}$ strani središnjeg dela zidova i na tavanici – P_t).

Skup jednačina termičkog modela celokupne kompaktne kioska se kompletira jednačinama hidrauličke ravnoteže za svaku od kontura vazduha sa Sl. 2 (koje važe za slučaj male snage sunčevog zračenja). Princip je objašnjen u [3].

Način izračunavanja snage razmene toplote zračenjem, kao i hidraulička šema za slučaj intenzivnog sunčevog zračenja, kao unapređenja modela u odnosu na model publikovan u [3], biće detaljno objašnjeni u narednoj publikaciji.



Slika 3. Toplotna šema zida kioska

III. REZULTATI MERENJA NA TERENU

Na Sl. 4 je prikazana TS 11 kV/0.4 kV nominalne snage 200 kVA na kojoj su vršena merenja. TS je kompaktne izvedbe, u limenom kućištu sa ventilacionim otvorima i sa priključnim odeljcima na srednji i niski napon postavljenim bočno u odnosu na centralni odeljak u kome je smešten transformator. TS se nalazi na $39^{\circ}37'41.4''S$ $176^{\circ}52'21.3''E$, u gradu Hastingsu na Novom Zelandu.

Registrovane su vrednosti struja, napona i snaga pomoću mrežnog analizatora, kao i temperature gornjeg ulja i ambijentalnih uslova – temperature ambijenta, solarne radijacije (W/m^2) i brzine i smera vetra.

Na Sl. 5 su prikazane vrednosti dvodnevni dijagrama struje (za fazu koja je bila najviše opterećena), temperature ambijenta, brzine i smera vetra i solarne iradijance u horizontalnoj ravni, van zone bilo kakvog zasenčenja od susednih objekata. Ovo je skup podataka koji je korišćen za proračune čiji se rezultati daju u nastavku rada.



Slika 4. Kompaktna TS u pogonu

IV. PRORAČUNSKE VARIJANTE

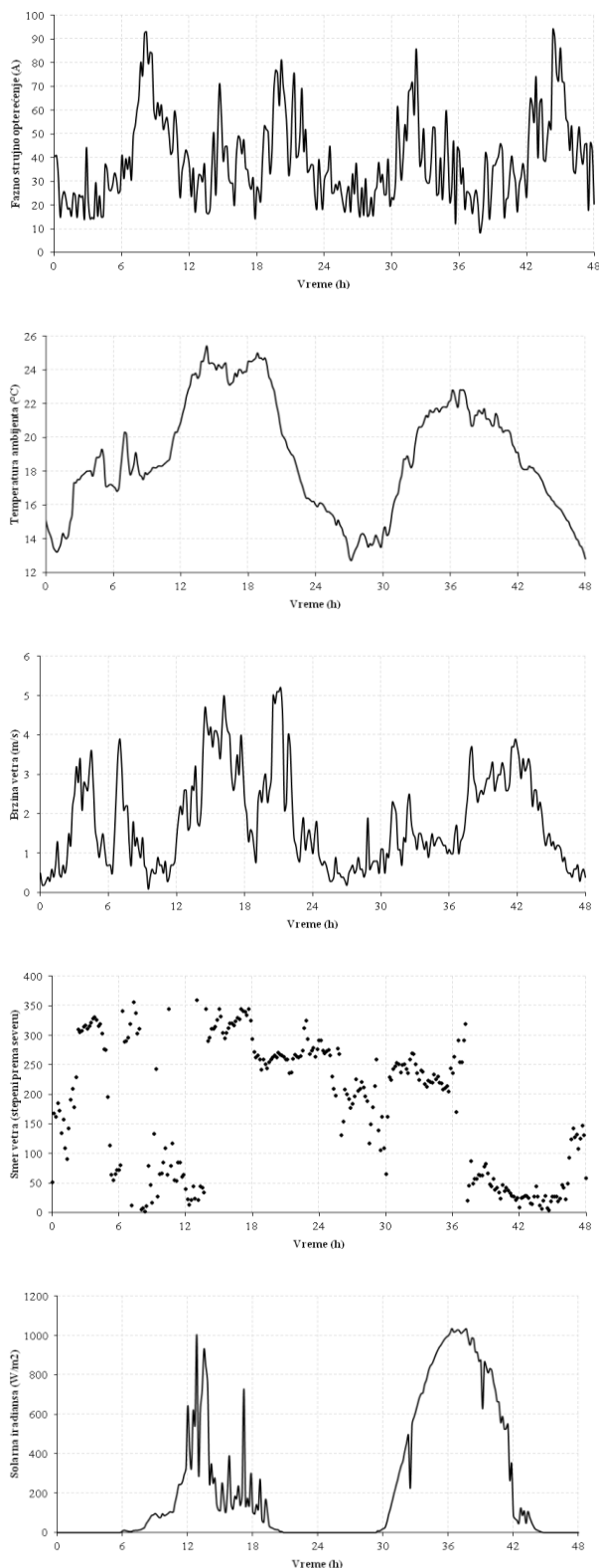
Pre nego što budu navedene varijante izvedenih proračuna, biće prodiskutovan način određivanja solarne iradijance na svakoj od strana kioska. Poznato je da se pravac direktnog upadnog sunčevog zračenja menja u toku dana, kao i da se dnevni dijagrami menjaju u toku godine. Promenu pravca, odnosno upadni ugao sunčevog zračenja na svaku od stranica kioska moguće je odrediti korišćenjem solarnog kalkulatora [5]. Pored direktne komponente sunčevog zračenja, koja je usmerena od Sunca do posmatrane površi na površini Zemlje, postoje i difuzna komponenta (potiče od rasipanja sunčevog zračenja na putu od Sunca do površi Zemlje) i reflektovana komponenta (potiče od refleksije sunca koje padne na površ tla oko površi za koju se određuje ukupna snaga sunčevog zračenja).

Postoje dva praktična aspekta koja je potrebno razmotriti, tj. dodatno analizirati i rešiti u odnosu na jednostavnu primenu solarnog kalkulatora.

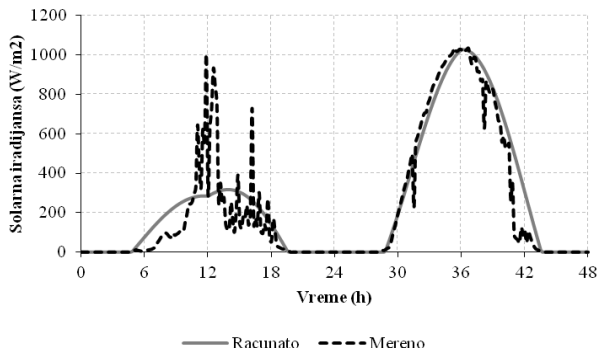
Prvi je meteorološki faktor. Solarni kalkulator daje dobru procenu solarnog potencijala (kumulativnu meru energije), ali ne i preciznu procenu u svakom trenutku. Trenutne vrednosti solarnog zračenja na svakoj od površi kioska su potrebne za verifikaciju razvijenog dinamičkog termičkog modela, kao i njegovu primenu. Zbog toga je postupljeno na sledeći način. Solarnim kalkulatorom su u svakom trenutku, na tačnoj lokaciji na kojoj je postavljen senzor za merenje solarne radijacije u horizontalnoj ravni, izračunavane direktna $q_{s \text{ dir } r}$, difuzna – $q_{s \text{ dif } r}$ i reflektovana $q_{s \text{ ref } r}$ komponenta sunčevog zračenja u horizontalnoj ravni. Ukupna vrednost solarne iradijance, dobijena kao zbir ove tri izračunate komponente iznosi $q_{s \text{ tot } r}$. S obzirom na to da je senzorom merena solarne iradijance u horizontalnoj ravni, računata vrednost reflektovane komponente je jednaka nuli. Merene vrednosti solarne iradijance će se označiti sa $q_{s \text{ tot } m}$. Korekcionni faktor, k_s , koji se primenjuje na komponente $q_{s \text{ dir } r}$, $q_{s \text{ dif } r}$ i $q_{s \text{ ref } r}$ dobijene solarnim kalkulatorom dat je jednačinom:

$$k_s = q_{s \text{ tot } m} / q_{s \text{ tot } r} \quad (1)$$

Drugi praktični aspekt su senke – samozasenčenje zidova kioska (dva od četiri zida kioska su uvek u senci), kao i senke od susednih objekata – u konkretnom slučaju nedaleko od kompaktne kioska TS se nalazio drvodred. Ovo je dodatno uzeto u obzir, kroz proračunski postupak analize geometrije i upadnog pravca sunčevog zračenja. Dakle, za sve površi koje su u senci, komponenta direktnog sunčevog zračenja je izjednačavana sa nulom. Difuzna komponenta je određivana kao vrednost izračunata solarnim kalkulatorom $q_{s \text{ dif } r}$ pomnožena sa faktorom k_s . Direktna komponenta sunčevog zračenja za površi koje nisu u senci je izračunavana kao vrednost $q_{s \text{ dir } r}$ izračunata solarnim kalkulatorom pomnožena sa faktorom k_s . Na Sl. 6 je, na istom grafiku, ponovljen dijagram solarne iradijance sa Sl. 5 (W/m^2), zajedno sa vrednošću izračunate promene iradijance (W/m^2), i dat faktor k_s .



Slika 5. Ulazni podaci o opterećenju i ambijentalnim uslovima

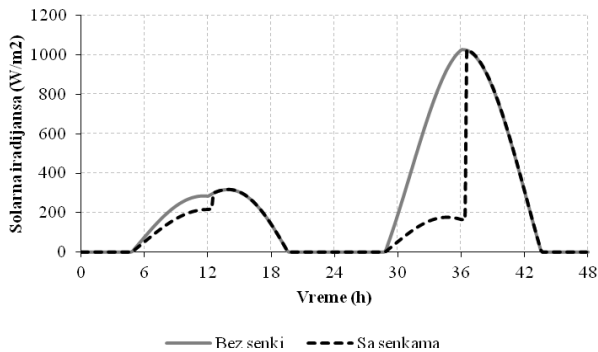


Slika 6. Merene i računane vrednosti solarne iradijance i faktor proporcionalnosti k_s

U sledećem poglavlju rada se prikazane snage zagrevanja koje potiču od gubitaka u transformatoru i snage zagrevanja usled apsorpcije sunčevog zračenja, i to za sledeće konfiguracije:

1. Stvarna situacija, sa malim opterećenjem TS i senkama od drvoreda – V1,
2. Stvarna pozicija TS, pri opterećenju čiji je oblik jednak stvarnom, a njegova vršna vrednost jednaka nominalnom – V2,
3. Kao 2, ali kao da ne postoji drvored, odnosno senke koje on stvara (dakle, smatra se da je TS u slobodnom prostoru).

Na Sl. 7 su prikazani dijagrami promene solarne iradijance izračunati u horizontalnoj ravni za slučaj da postoji drvored (realna situacija, kao u 1. i 2.), kao i da ne postoji drvored – V3.



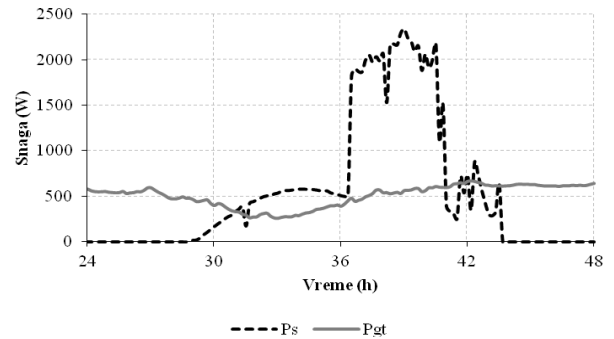
Slika 7. Solarne iradijance u prisustvu i odsustvu senke

V. REZULTATI

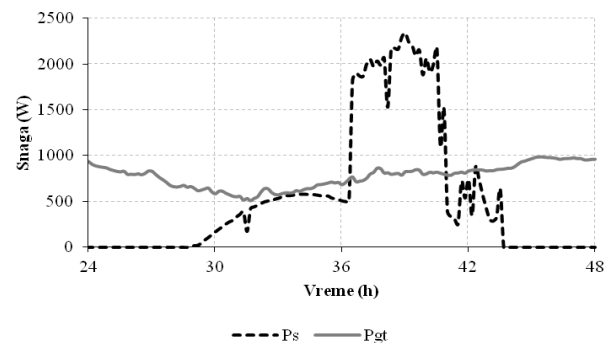
Kao rezultat, u nastavku se prikazuju komponente snage zagrevanja (P_g), i to:

- Zbirni gubici u transformatoru P_{Cu}, P_{Fe} (Sl. 1) – P_{gt}
- Snaga apsorpcije energije koja dolazi od sunca na svim spoljašnjim površinama zida kioska q_{Sunca} (Sl. 3) – P_s

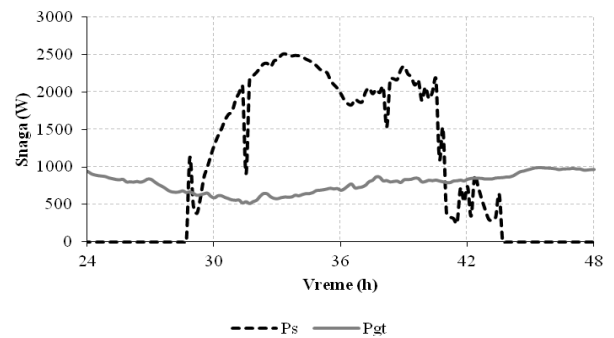
Rezultati su dati na Sl. 8, 9 i 10, respektivno za varijante proračuna V1, V2 i V3, koje su navedene u poglavlju IV. Vrednosti P_{gt} i P_s su prikazane za opterećenje u toku drugog od dva dana prikazana na Sl. 5.



Slika 8. Snage zagrevanja pri malom opterećenju i u prisustvu senki



Slika 9. Snage zagrevanja pri povećanom opterećenju i u prisustvu senki



Slika 10. Snage zagrevanja pri povećanom opterećenju i u odsustvu senki

VI. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je orijentisan ka globalnom prikazu toplotne energije koja se stvara u zatvorenom termičkom sistemu koji čine transformator i kućište koje apsorbuje energiju sunčevog zračenja. Temperatura unutar kućišta, i što je mnogo važnije, unutar transformatora, zavisi od mehanizama prenosa, odvođenja i akumulisanja sveukupne toplote koja postoji u posmatranom sistemu.

U radu su na najkraći mogući način prezentovani principi na kojima je uspostavljen dinamički termički model kompaktne kiosk transformatorske stanice. Naše druge publikacije se bave detaljima o modelu, kao i verifikacijom modela

Sa praktičnog stanovišta, interesantno je uporediti snage generisanja gubitaka u transformatoru i usled sunca, kada je kiosk na otvorenom prostoru ili u senci drvoreda. Rezultati su dati za transformator sa malim opterećenjem, kakvo je bilo tokom eksperimenata, kao i za opterećenje koje se ima u slučaju da vršna vrednost struje (istog oblika kao dijagram registrovan tokom eksperimenta) dostiže nominalnu vrednost. Rezultati su dati za kiosk transformatorsku stanicu 200 kVA, sa trofaznim transformatorom 11 kV/0.4 kV.

Na osnovu grafika sa Sl. 8, 9 i 10, može se zaključiti da je u slučaju posmatrane kompaktne TS snaga zagrevanja od strane sunca srazmerna nominalnim gubicima u transformatoru, zbog čega se uticaj sunčevog zračenja mora uzeti u obzir u termičkom modelu kompaktne kiosk TS.

Takođe se može uočiti i efekat prirodnog hlada u kome se nalazi TS. Poređenjem komponente P_s od 29. do 36 sata sa Sl. 9 i 10, jasno se uočava da je uticaj zagrevanja znatno smanjen u slučaju postojanja drvoreda koji smanjuje uticaj direktne komponente sunčevog zračenja. U zavisnosti od gustine i visine rastinja i godišnjeg doba faktor zasenčenja se menja u toku godine, ali svakako najveći doprinos ima u letnjem periodu kada je ambijentalna temperatura viša, odnosno uslovi hlađenja lošiji.

LITERATURA

- [1] IEC 60076-7:2018: Power transformers - Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers
- [2] SRPS EN 60076-2:2011: Energetski transformatori - Deo 2: Porast temperature kod transformatora uronjenih u tečnost
- [3] Z. Radakovic, M. Jevtic, B. Das, "Dynamic thermal model of kiosk oil immersed transformers based on the thermal buoyancy driven air flow", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 92, pp. 14-24, November 30, 2017.
- [4] S. Stanisic, M. Jevtic, B. Das, Z. Radakovic, "FEM CFD versus lumped thermal model of kiosk substation with the oil immersed distribution transformer", Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, vol. 31, No 3, pp. 411-423, Jun 2018 (DOI 10.2298/FUEE1803411S).
- [5] Z. Radaković, N. Paunović, I. Mitev, "Optimalno projektovanje hibridnog sistema za off-grid napajanje električnom energijom", 17. Telekomunikacioni forum TELFOR 2009, Beograd, 24 – 26. November 2009.

ABSTRACT

The paper discusses the heating of the compact transformer station (TS) of 11 kV / 0.4 kV in real exploitation conditions, during network operation, variable load, ambient temperature, direction and wind velocity, and solar radiation. Heat sources are losses in the transformer itself and solar radiation. Accumulated heat exists both in the transformer and in the kiosk, where it is much smaller. Heat transfer is done by natural airflow and radiation (conduction is small). The paper presents the relationship between the power of losses in the transformer and the heating from the sun for the situation at which the measurements were made and then also are simulated hypothetical situations of nominal load and absence of shadows.

HEATING OF THE COMPACT TRANSFORMER POWER SUBSTATION

Milica Jevtic, Zoran Radakovic