Broj rada: R4-05
DOI:10.46793/CIRED2026.R4-05_175

ANALIZA MAKSIMALNOG KAPACITETA SOLARNIH ELEKTRANA KOJI SE MOŽE PRIKLJUČITI U KONZUMNOM PODRUČJU DISTRIBUTIVNOG TRANSFORMATORA UZIMAJUĆI U OBZIR NJEGOVA TERMIČKA SVOJSTVA

ANALYSIS OF THE MAXIMUM CAPACITY OF SOLAR POWER PLANTS THAT CAN BE CONNECTED TO THE LOAD AREA OF A DISTRIBUTION TRANSFORMER CONSIDERING ITS THERMAL CHARACTERISTICS

Lazar NIKOLIĆ, INSTITUT NIKOLA TESLA AD, Republika Srbija*
Tamara MANDIĆ, INSTITUT NIKOLA TESLA AD, Republika Srbija
Dragutin POPOVIĆ, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Republika Srbija
Milica DILPARIĆ, INSTITUT NIKOLA TESLA AD, Republika Srbija
Sara STAMATOVIĆ, INSTITUT NIKOLA TESLA AD, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Sve izraženija integracija obnovljivih izvora energije u distributivne elektroenergetske mreže, naročito solarnih elektrana, dovodi do značajnih promena u tokovima energije unutar sistema.Povećavanje instalisane snage solarnih elektrana u distributivnom elektroenergetskom sistemu može izazvati pojavu suprotnog toka energije kroz transformator, koje može biti veće od njegovog prethodnog opterećenja kada je napajana samo potrošnja. S obzirom da solarne elektrane najviše proizvode tokom letnjeg perioda, kada su i temperature ambijenta najveće, takav režim rada može značajno uticati na termičko opterećenje transformatora i posledično ubrzati njegovo starenje. U ovom radu, cilj je proceniti maksimalni kapacitet solarnih elektrana koji se može bezbedno priključiti u konzumnom području distributivnog transformatora, uz očuvanje njegovog životnog veka i poštovanje tehničkih ograničenja. Termički model transformatora razvijen je u skladu sa važećim IEC standardima koji definišu termička ograničenja, temperature namotaja i kriterijume starenja izolacionog sistema. Primena dinamičkog termičkog rejtinga (Dynamic Thermal Rating – DTR) omogućava realističnu i vremenski zavisnu procenu maksimalnog opterećenja transformatora u zavisnosti od promenljivih radnih i ambijentalnih uslova koji uključuju vremenske serije opterećenja transformatora, ambijentalnu temperaturu i intenzitet solarne iradijacije. Pored osnovnog termičkog opterećenja, analiza uključuje i dodatne uticaje koji doprinose povećanju ukupnog zagrevanja transformatora. Posebna pažnja posvećena je uticaju varijacija napona izazvanih priključenjem solarnih elektrana, koje dovode do promena Džulovih gubitaka u namotajima i magnetnih gubitaka u jezgru transformatora. Takođe,razmatran je i uticaj solarne iradijacije na zagrevanje spoljašnje površine kućišta transformatora, što dodatno povećava temperaturu ulja i namotaja. Ovi efekti značajno doprinose ukupnom termičkom opterećenju i moraju se uključiti u proračun da bi se osigurao bezbedan rad transformatora. Kao rezultat, formiran je algoritam koji omogućava integrisanu procenu maksimalnog dozvoljenog kapaciteta solarnih elektrana u konzumnom području transformatora, uz uvažavanje stvarnih radnih uslova, dodatnog

* Lazar Nikolić, lazar.z.nikolic@ieent.org

termičkog opterećenja i naponskih uticaja, kao i primenu standardizovanih kriterijuma starenja definisanih IEC normama. Primena predloženog algoritma obezbeđuje pouzdan i sveobuhvatan okvir za planiranje priključenja solarnih kapaciteta u distributivnu mrežu, uz očuvanje životnog veka transformatora.

Ključne reči: Termički model transformatora, DTR, solarne elektrane, varijacije napona

ABSTRACT

The increasing integration of renewable energy sources, particularly solar power plants, into distribution networks leads to significant changes in power flows within the system. The growth of installed solar capacity in a distribution system can cause reverse power flow through the transformer, which may exceed its previous loading when supplying only local consumption. Since solar power plants generate the most energy during the summer period, when ambient temperatures are highest, such operating conditions can substantially affect the transformer's thermal loading and consequently accelerate its aging. The aim of this study is to assess the maximum capacity of solar power plants that can be safely connected to the load area of a distribution transformer, while preserving its service life and complying with technical limitations. The transformer's thermal model has been developed in accordance with applicable IEC standards, which define thermal limits, winding temperatures, and aging criteria for the insulation system. The application of Dynamic Thermal Rating (DTR) allows for a realistic and time-dependent assessment of the transformer's maximum loading based on varying operational and ambient conditions, including time series of transformer loading, ambient temperature, and solar irradiation intensity. In addition to the basic thermal loading, the analysis considers supplementary factors contributing to the overall heating of the transformer. Special attention is given to voltage variations caused by the connection of solar power plants, which lead to changes in Joule losses in the windings and magnetic losses in the transformer core. Furthermore, the impact of solar irradiation on the heating of the transformer's external housing is considered, which further increases the temperature of the oil and windings. These effects significantly contribute to the total thermal loading and must be included in the calculations to ensure the safe operation of the transformer. As a result, an algorithm has been developed that enables an integrated assessment of the maximum allowable capacity of solar power plants in the transformer's load area, taking into account actual operating conditions, additional thermal loading, and voltage effects, as well as the application of standardized aging criteria defined by IEC norms. The proposed algorithm provides a reliable and comprehensive framework for planning the connection of solar capacities to the distribution network while preserving the transformer's service life.

Keywords: Transformer thermal model, DTR, solar power plants, voltage variations

UVOD

Pored brojnih pozitivnih efekata koje sa sobom nosi integracija OIE u elektroenergetski sistem, postoji i veliki broj izazova sa kojima se susreće pre svega operator sistema, a zatim i investitori, kao i krajnji korisnici. Praktično na svim distributivnim područjima u Republici Srbiji, postoji četvoronaponski koncept mreže, pri čemu na svim naponskim nivoima operator distributivnog sistema vrši priključenje proizvodnih jedinica nakon sprovedene procedure priključenja. Prema podnetim zahtevima za priključenje, fokus investitora poslednjih godina je upravo usmeren na priključenje proizvodnih jedinica najveće snage na 35 kV naponski nivo elektrodistributivne

mreže. [3] Sve veći broj distributivnih fotonaponskih elektrana na 35 kV i 10 kV naponski nivo donosi sa sobom značajan kumulativni efekat na distributivni sistem.

Proizvodne jedinice se pojavljuju u tri načina rada sa stanovišta distrbutivnog sistema (u daljem tekstu DSEE):

- Isporuka celokupne električne energije u DSEE,
- Korišćenje celokupne proizvedene električne energije bez predaje u DSEE
- Kombinacija prethodna dva načina rada, odnosno deo proizvedene električne energije koristi u instalacijama korisnika, a deo predaje u DSEE.

Proizvedena električna enegija koju korisnici koriste za sopstvene potrebe (bez predaje u DSEE) smanjuje opterećenje transformatora, pošto se ista ne preuzima iz DSEE, proizvedena električna enegija koja se isporučuje u DSEE, do određene vrednosti, takođe smanjuje opterećenje transformatora, pošto delimično ili potpuno podmiruje potrebe za energijom svih korisnika u reonu transformatora. Međutim, dalje povećanje isporuke električne energije u DSEE, ponovo povećava opterećenje transformatora, ali „u suprotnom smeru“. Intenzivna isporuka električne energije u DSEE može dovesti čak i do opterećenja transformatora koje je veće od njegovog ranijeg opterećenja kada je napajana samo potrošnja. Pored toga, proizvodnja iz solarnih proizvodnih jedinica priključenih na DSEE, menja dnevni i sezonski dijagram opterećenja transformatora 110/x kV/kV i 35/x kV/kV (pri čemu opterećenje može biti povećano), s obzirom da solarne elektrane najviše proizvode u letnjem periodu i sredinom dana.

Glavni ograničavajući faktor opterećivanja transformatora je njegovo zagrevanje, a čak i relativno mala prekoračenja temperature iznad propisane mogu izazvati njegovo ubrzano starenje. Međutim, transformator, kao masivan element, ima značajnu termičku inerciju, odnosno njegova termička vremenska konstanta je reda i nekoliko sati, tako da nagle kratkotrajne promene nemaju uticaj na zagrevanje. U realnim uslovima rada transformatora, kada su ambijentalni uslovi povoljniji, moguće je kratkotrajno opteretiti transformator iznad njegovog nominalnog kapaciteta, jer se usled značajne termičke inercije njegova temperatura ne menja odmah pri promeni opterećenja ili temperature okoline. Na primer, ako transformator kratko vreme radi sa većim opterećenjem od nominalnog, on se neće odmah pregrejati, jer mu treba vremena da dostigne kritičnu temperaturu. Sa druge strane, na njegovo zagrevanje, odnosno na temperaturu kao meru zagrevanja, utiče vremenski dijagram efektivnih vrednosti strujnog opterećenja i vremenski dijagram temperature ambijenta.

Razvijena je metodologija proračuna opterećenja transformatora 110/x kV i 35/x kV koja ima za cilj maksimalno iskorišćenje postojećih transformatora 110/x kV i 35/x kV za priključenje solarnih proizvodnih jedinica na DSEE. Metodologija se zasniva na pristupu poznatom kao dinamičko određivanje nominalnog opterećenja transformatora (DTR; *Dynamic Transformer Rating*), i uvažava vremenske dijagrame potrošnje, vremenske dijagrame proizvodnje solarnih proizvodnih jedinica, vremenske dijagrame temperature ambijenta i termičku inerciju

Ova metoda procenjuje trenutni kapacitet transformatora, uzimajući u obzir ograničenja kao što su temperatura najtoplije tačke namotaja (*eng. hotspot temperature*), temperatura gornjeg sloja ulja i uticaj na skraćenje životnog veka transformatora. Cilj *DTR* metode jeste da u realnom vremenu proceni dozvoljeni kapacitet transformatora, uzimajući u obzir trenutno opterećenje, temperaturu okoline i režim hlađenja transformatora. Koriste se termički modeli i merenja u

realnom vremenu kako bi se dobila vremenska serija trenutno dozvoljenog opterećenja transformatora.

Primenom *DTR* metodologije povećava se potencijalna instalisana snaga novih kapaciteta iz obnovljivih izvora energije koji se mogu priključiti na distributivnu mrežu, bez potrebe za dodatnim investicijama i promene infrastrukture mreže.

Analize su izvršene na primeru jednog transformatora 110/21/10,5 kV/kV/kV u urbanom konzumu, pri čemu je bilo potrebno utvrditi posebne dijagrame za karakteristične dane (radni dan, dan vikenda) i to po sezonama.

1 PREGLED PODLOGA I PODATAKA

1.1 Meteorološki podaci

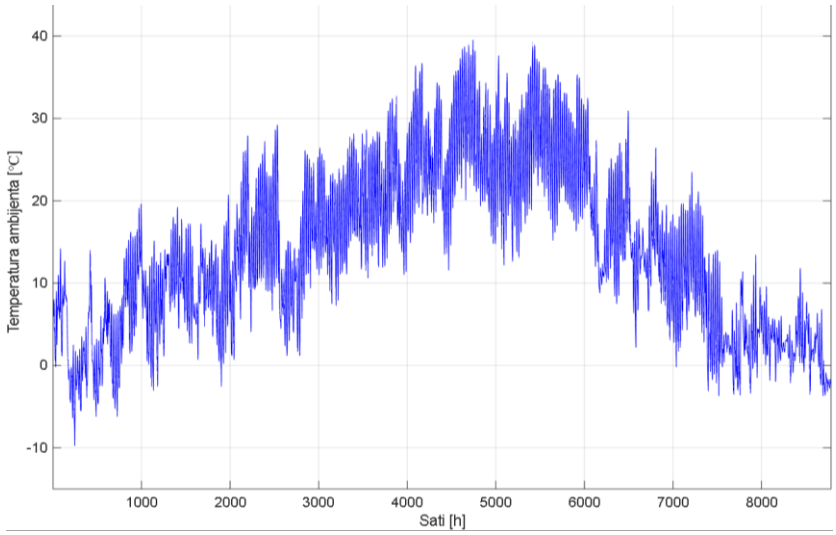
Uticaj temperature okoline i solarnog zračenja na rad i efikasnost transformatora analiziran je na osnovu meteoroloških podataka za jednu celu godinu.

Za lokaciju analizirane trafostanice moguće je dobiti podatke o ukupnoj horizontalnoj iradijaciji koja dospeva do tla. Potrebni set podataka preuzet je iz *PV GIS* baze (*Photovoltaic Geographical Information System, European Commission – Joint Research Centre, JRC*) [2]. Svi podaci dostupni su kao usrednjeni na godišnjem, mesečnom, sedmičnom ili satnom nivou i odabrane su satne vrednosti iradijacije za period od godinu dana. Preuzeti podaci obuhvataju:

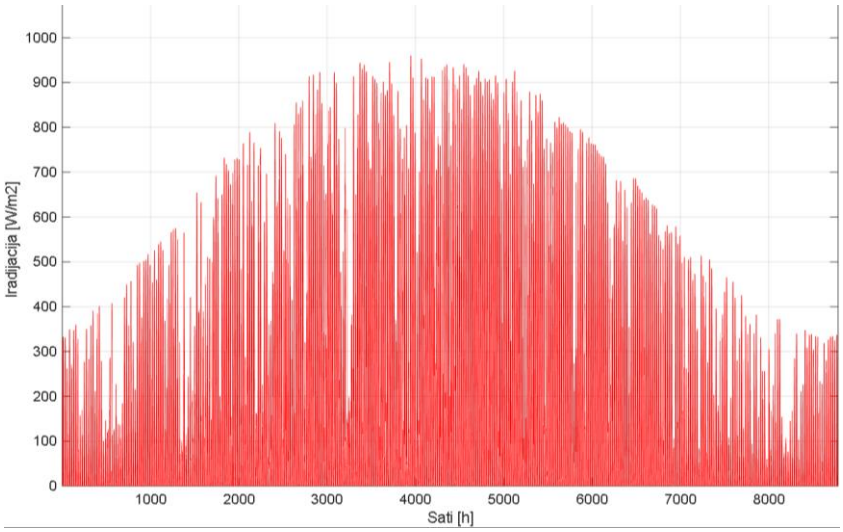
- Dnevne dijagrame ambijentalne temperature po satima (365 dana),
- Satne vrednosti sunčevog zračenja tokom cele godine.

Na osnovu podataka o iradijacijii dalje je moguće estimirati satne vrednosti izlazne snage solarnih elektrana. Izlazna snaga solarne elektrane linearno je zavisna od dolazne količine Sunčeve energije. Snaga na AC strani invertora dobija se množenjem DC snage određenim faktorima, kao što su koeficijent smanjenja snage usled gubitaka u invertoru, usled zaprljanja ili neuparenosti modula i drugo. Ovi koeficijenti ne utiču bitno na oblik grafika. Sa druge strane, bitan uticaj na izlaznu snagu iz solarnih elektrana ima temperatura ambijenta i iradijacija, koji će u daljoj metodologiji biti uvaženi.

Na narednim slikama (*Slika 1* i *Slika 2*) dat je grafički prikaz godišnje temperature ambijenta i iradijacije na lokaciji transformatora i to na satnom nivou, respektivno.



Slika 1 – Grafički prikaz temperature ambijenta na satnom nivou za celu godinu



Slika 2 – Grafički prikaz horizontalnog sunčevog zračenja na satnom nivou za celu godinu

1.2 Tehnički podaci o transformatoru

U narednoj tabeli dati su svi relevantni podaci za analizirani transformator, koji je identifikovan kao tipični predstavnik urbanog konzumnog područja.

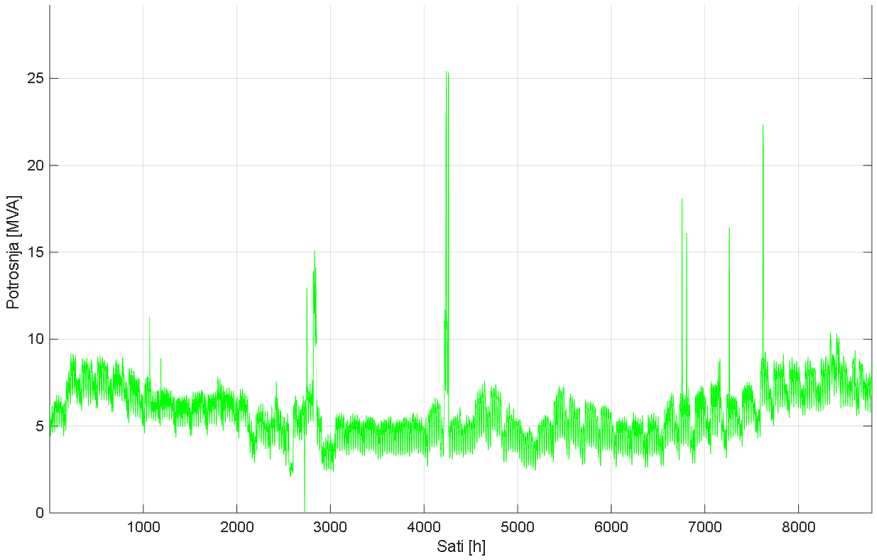
Tabela I – Podaci oanaliziranom transformatoru 110/21/10,5 kV/kV/kV

Parametar	**Vrednost parametra**
Nominalni napon (primar) Unom (kV)	110
Nominalni napon (sekundar) Unom2 (kV)	21
Nominalni napon (tercijar) Unom3 (kV)	10,5
Nominalna snaga (primar) Snom1 (MVA)	31,5
Nominalna snaga (sekundar) Snom2 (MVA)	31,5
Nominalna snaga (tercijar) Snom3 (MVA)	10,5

Gubici u bakru (primar-sekundar) Pcu12 (kW)	182,294
Gubici u bakru (primar-tercijar) Pcu13 (kW)	35,056
Gubici u bakru (sekundar-tercijar) Pcu23 (kW)	26,004
Gubici u gvožđu Pfe (kW)	25,2
Napon kratkog spoja (primar-sekundar) Uk12 (kV)	15,48
Napon kratkog spoja (primar-tercijar) Uk13 (kV)	8,09
Napon kratkog spoja (sekundar-tercijar) Uk23 (kV)	2,04
Ukupna masa (t)	56,6
Masa ulja (t)	11,5
Vremenska konstanta zagrevanja ulja τ_R (h)	3,5
ΔTR gornjeg ulja (za nominalno opterećenje u stacionarnom stanju) [K]	55
Faktor emisivnosti	0,75

1.3 Dijagram opterećenja transformatora

Za analizu postojećeg i planiranog opterećenja transformatora, korišćeni su dnevni dijagrami opterećenja transformatora (potrošnja) za svaki dan u razmatranoj godini, po satima, mereno sa 110 kV strane. Treba napomenuti da se dijagram opterećenja transformatora odnosi na ukupno opterećenje u realnom stanju, odnosno uvažena je i proizvodnja svih već postojećih malih solarnih elektrana koje pripadaju ovoj trafostanici. Ovi podaci su poslužili kao osnova za simulaciju novog režima rada transformatora nakon priključenja solarne elektrane, kao i za procenu njegovog termičkog ponašanja i stepena iskorišćenja.

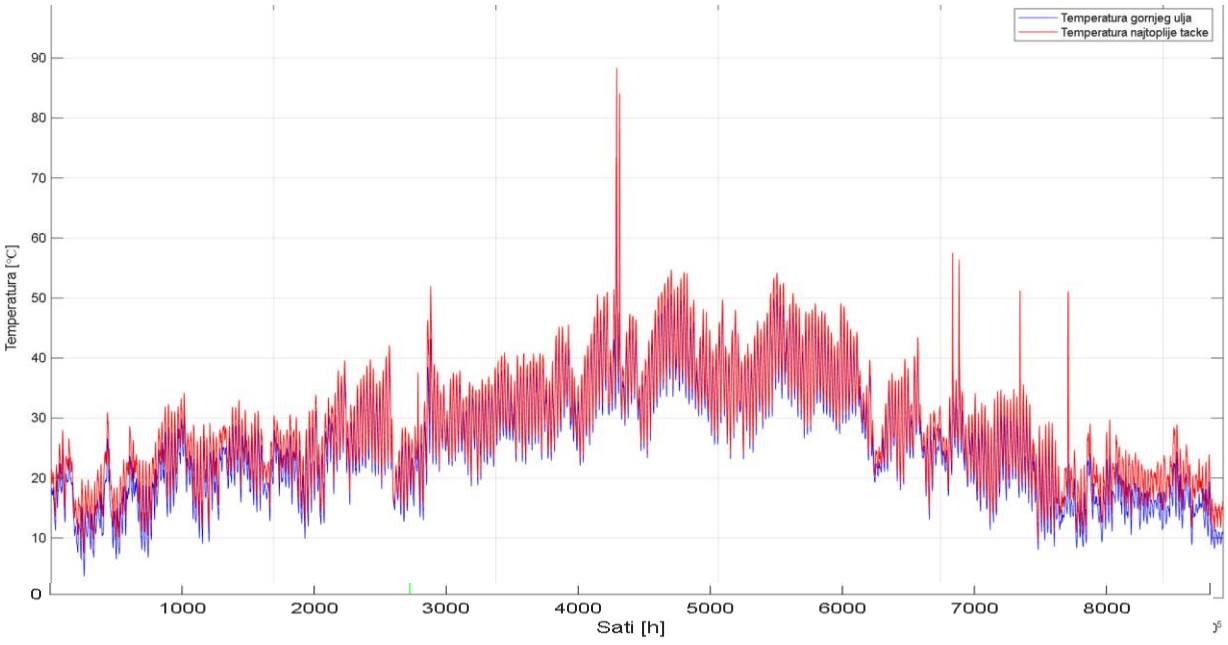


Slika 3 – Grafički prikaz stvarnog opterećenja transformatora na satnom nivou za celu godinu

1.4 Standard IEC 60076-7 [1]

Međunarodni standard IEC 60076-7 koji propisuje Internacionalna elektrotehnička komisija (eng. *International Electrotechnical Commission*) odnosi se na termičke aspekte rada transformatora. Ovaj standard je primenljiv za uljne transformatore i pruža smernice za rad pod različitim uslovima, sa akcentom na zagrevanju, klasama izolacije i radu u uslovima varijabilnog opterećenja. Standard uvodi dva matematička modela za procenu termalnog ponašanja transformatora, a to su eksponencijalni model (pogodniji za laboratorijske uslove) i diferencijalni model (pogodniji za dinamično i promenljivo opterećenje, kakvo je u stvarnim uslovima rada). Definisana je i podela transformatora u odnosu na način hlađenja, kao i granične vrednosti porasta temperature. Ovaj standard daje smernice za izradu termičkog modela transformatora, definiše metodologiju za proračun porasta temperature u namotajima i izolaciji, kao i načine procene životnog veka izolacionog sistema na osnovu temperaturnog opterećenja.

Najznačajnija promenljiva u pogledu termičkih analiza na koju preopterećenje direktno utiče jeste temperatura najtoplije tačke u namotaju transformatora (*hotspot* temperatura θ_{HS}). Ona predstavlja temperaturu unutar namotaja transformatora na mestu gde je najveće lokalno zagrevanje (najkritičnija tačka sa stanovišta naprezanja izolacije) i direktno utiče na brzinu starenja izolacije i pouzdanost rada transformatora. Za većinu transformatora, temperatura gornjeg ulja unutar namotaja nije precizno poznata, dok je, sa druge strane, temperaturu gornjeg ulja na vrhu rezervoara relativno lako dobiti, direktnim merenjem ili proračunom. Na osnovu ove temperature se dalje proračunava temperatura najtoplije tačke (ulja unutar namotaja). Kao rezultat dobija se porast temperature najtoplije tačke koji je jednak porastu temperture gornjeg ulja uvećanom za $H \times g_r$, i *Slika 4* prikazuje rezultate za razmatrani transformator. Na slici je plavom bojom prikazana temperatura gornjeg ulja transformatora tokom cele godine, a crvenom temperatura najtoplije tačke.



Slika 4 – Temperatura gornjeg ulja transformatora tokom cele godine (plavo), i temperatura najtoplije tačke (crveno)

2 METODOLOGIJA PRORAČUNA

2.1 Matematički model

U ovom radu usvojen je metod diferencijalnih jednačina, s obzirom na to da omogućava kontinualno praćenje dinamike promene temperature i realističniji prikaz termičkog odziva transformatora. Sa druge strane, metod eksponencijalnih jednačina podrazumeva promenu opterećenja u obliku step-funkcije, odnosno naglu promenu opterećenja između dva stacionarna stanja, što je manje pogodno za analizu realnih vremenski promenljivih režima rada.

Da bi diferencijalna metoda dala dobre rezultate proračuna temperature, zahteva se da vremenski koraci promene svih ulaznih podataka u model koji su dati u obliku vremenske serije budu manji od polovine najmanje vremenske konstante u modelu.

Kako je najmanja vremenska konstanta u modelu vremenska konstanta namotaja koja je reda nekoliko minuta u zavisnosti od veličine transformatora i načina njihovog hlađenja, vremenski koraci promene ulaznih podataka treba da budu reda par minuta. Kako su ulazni podaci najčešće dati kao srednje satne vrednosti, najjednostavniji način da se izvrši diskretizacija u minutnu rezoluciju, a da se zadrži odgovarajuća tačnost podataka, jeste interpoliranjem satnih vrednosti na kratke vremenske intervale. Transformator koji je korišćen u ovom radu ima vremensku konstantu namotaja od deset minuta, što znači da interval ulaznih podataka mora biti manji od pet minuta, tako da je u proračunu usvojena rezoluicija od dva minuta.

Diferencijalne jednačine opisuju promene fizičkih veličina u kontinuiranom vremenskom intervalu, što ih čini teorijski preciznim modelima. Međutim, u praksi, parametri kao što su struja opterećenja i temperature ambijenta nisu poznati kao neprekidne funkcije vremena, već se mere i registruju u određenim vremenskim intervalima (diskretno). Zbog toga je rešavanje diferencijalnih jednačina u kontinuiranom obliku komplikovano i često nemoguće u realnim uslovima.

Prebacivanje diferencijalnih jednačina u diferencne jednačine omogućava diskretizaciju vremena, odnosno posmatranje sistema u odvojenim, malim vremenskim koracima. Ovaj pristup pojednostavljuje rešavanje jednačina jer se sada mogu koristiti numeričke metode:

$$D\theta_o = \frac{Dt}{k_{11}\tau_o}\left[\left(\frac{1+K^2R}{1+R}\right)^x \cdot \Delta\theta_{o,r} - (\theta_o - \theta_a)\right]$$

$$\theta_{o(n)} = \theta_{o(n-1)} + D\theta_{o(n)}$$

$$D\Delta\theta_{h1} = \frac{Dt}{k_{22}\tau_w} \cdot \left(k_{21} \cdot \Delta\theta_{h,r} \cdot K^y - \Delta\theta_{h1}\right)$$

$$D\Delta\theta_{h2} = \frac{Dt}{(1/k_{22})\tau_o} \cdot \left((k_{21}-1) \cdot \Delta\theta_{h,r} \cdot K^y - \Delta\theta_{h2}\right)$$

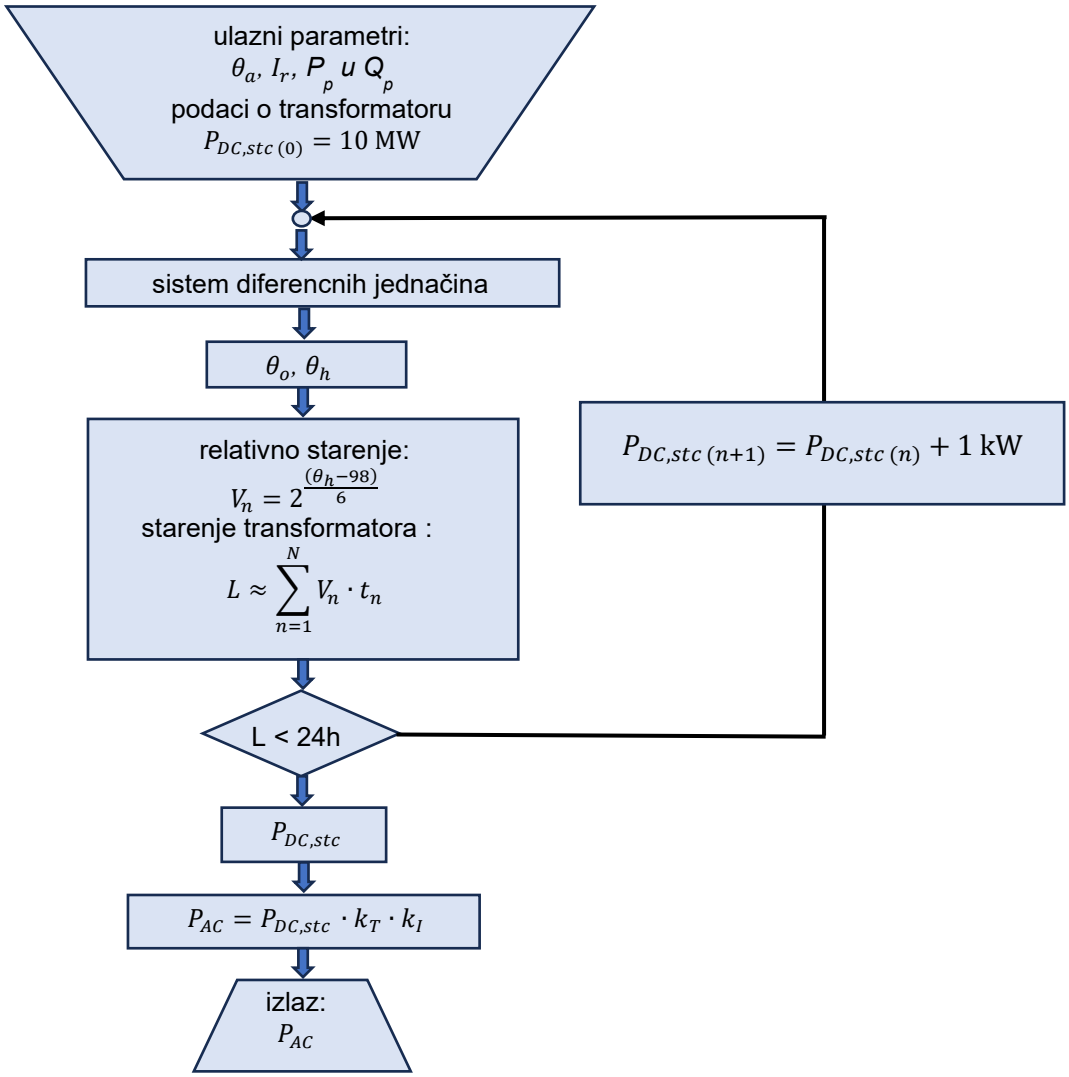
$$\Delta\theta_{h(n)} = \Delta\theta_{h1(n)} - \Delta\theta_{h2(n)}$$

$$\theta_{h(n)} = \theta_{o(n)} + \Delta\theta_{h(n)}$$

Prethodni set jednačina kao rezultat daje temperaturu najtoplije tačke namotaja (θ_h) i temperaturu gornjeg ulja (θ_o), pri čemu konstante k_{11}, k_{21}, k_{22}, kao i vremenske konstante τ_w (namotaj) i τ_o (ulje) zavise od konkretnog transformatora. Koeficijent R predstavlja odnos

gubitaka u bakru pri naznačenoj struji i gubitaka u gvožđu, a K faktor opterećenja transformatora. Parametri $\Delta\theta_{o,r}$ i $\Delta\theta_{h,r}$ predstavljaju porast temperature najtoplije tačke namotaja pri naznačenoj struji i porast temperature gornjeg ulja u stacionarnom stanju pri naznačenim gubicima, respektivno.

Ulazni parametri proračuna (temperatura ambijenta, iradijacija i aktivna i reaktivna snaga potrošnje) zadati su u obliku vremenskih serija za jedan karakterističan dan, a kao inicijalna vrednost instalisane snage solarnih elektrana uzima se sa DC strane vrednost od 10 MW. Kada su definisani ulazni parametri, ulazi se u iterativni postupak rešavanja sistema diferencnih jednačina koje kao izlaz daju temperaturu gornjeg ulja i najtoplije tačke namotaja. U svakoj iteraciji računa se relativno starenje transformatora na osnovu sistema jednačina iz standarda[1], kao što je prikazano algoritmom ispod. Ukoliko je dobijeno dnevno starenje transformatora manje od 24 časa, moguće je povećati instalisanu snagu elektrana (definisani korak od 1 kW) i na taj način se ulazi u narednu iteraciju. Kada se dostigne da je dobijeno starenje sa termičkog aspekta za karakterističan dan veće od 24 sata, izlazi se iz petlje, i kao konačna vrednost uzima se DC snaga dobijena u poslednjoj iteraciji, pomnožena koeficijentima koji se odnose na uticaje iradijacije i temperature ambijenta na izlaznu snagu, kako bi se dobila tražena AC snaga.



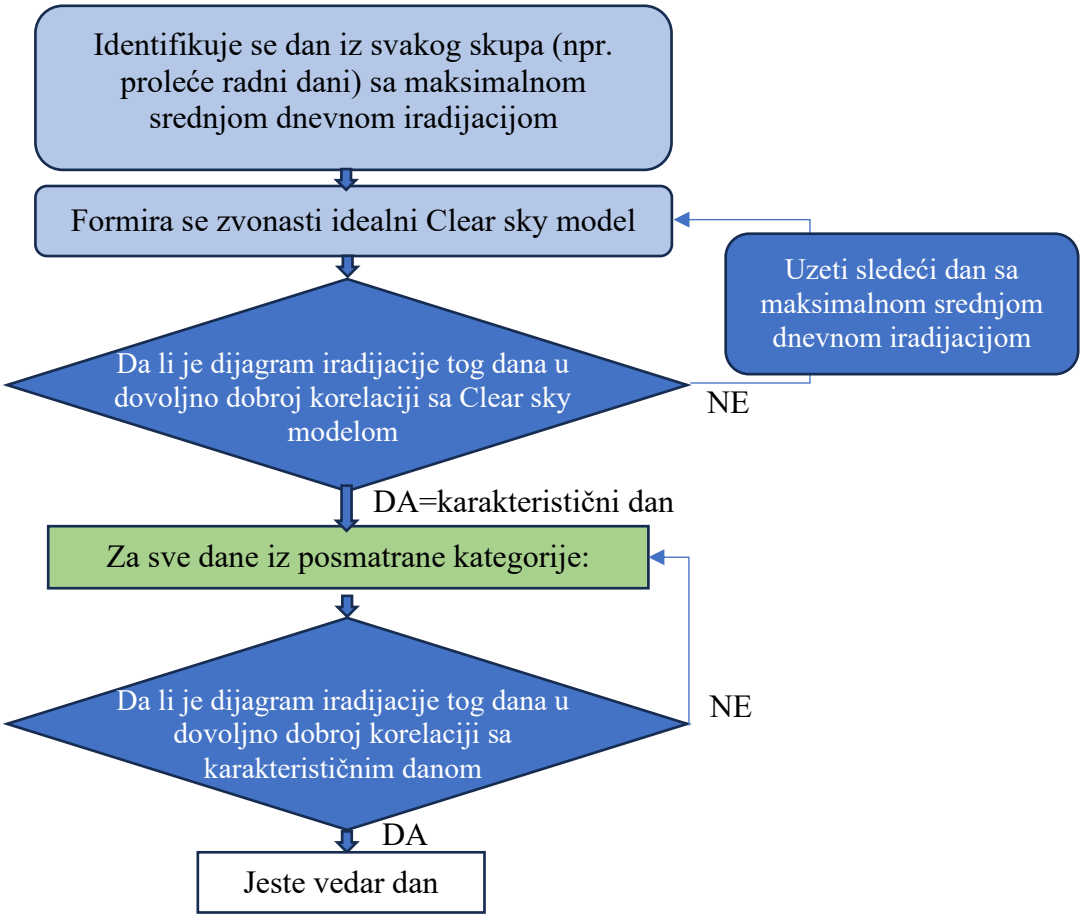
Slika 6 – Algoritam metodologije za odredjivanje maksimalnog mogućeg kapaciteta solarnih elektrana koji se može priključiti u konzumnom području transformatora

2.2 Izbor tipičnih dijagrama potrošnje

Nakon što je utvrđeno ponašanje opterećenja transformatora na godišnjem nivou, kao i njegovih termičkih parametara od interesa, pre svega temperature *hotspot*-a, bilo je potrebno odrediti i tipične dijagrame ponašanja ovih veličina za različite sezone, kao i za radni dan i dan vikenda. Sprovedena je podela podataka prema godišnjim dobima, pri čemu je uzeto u obzir da jesen i zimu karakterišu niski nivoi sunčeve iradijacije usled kraćeg trajanja dnevne svetlosti i nižeg ugla pada sunčevih zraka. To znači da će u ovim periodima postojati manji potencijal i manji učinak solarnih panela. Pored toga u ovim periodima se očekuju niže temperature ambijenta u odnosu na proleće ili leto. Budući da temperatura ambijenta značajno utiče na zagrevanje transformatora, termički proračun bi za ove periode godine mogao da da vrednost instalisane snage solarnih elektrana veću nego u periodu proleća ili leta. Takve vrednosti bi, zbog većih temperatura u toplijem delu godine bile neprimenljive, jer bi termički opterećivale transformator i dovodile do ubrzanog starenja. Iz tih razloga može se zaključiti da je za termičke proračune fokus na letnjoj i prolećnoj sezoni.

Za proleće i leto posebno su izdvojeni radni dani i dani vikenda, i konstruisane su familije krivih koje grafički prikazuju profile opterećenja tokom 24 časa, za svaku od tih kategorija, sa dvominutnom rezolucijom. Zatim je iz familije krivih izdvojena po jedna kriva koja predstavlja tipični dijagram potrošnje u zavisnosti od godišnjeg doba i uslova (radni dan ili vikend).

Izdvajanje tipičnog dijagrama realizovano je tako što su, pre svega, iz svakog skupa podataka (npr. proleće radni dani) odabrani samo dani čiji solarni potencijal odgovara vedrom danu, na sledeći način:



Slika 7 – Algoritam odredjivanja dana sa Clear sky iradijacijom

Mera dobre korelacije između dve veličine može se odrediti Pirsonovim (*Pearson*) koeficijentom linearne korelacije, koji se za promenljive *x* i *y* (veličine čija se međusobna korelacija ispituje), izračunava po formuli:

$$R = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

gde su σ_{xy} коваријанса, a σ_x i σ_y standardne devijacije promenljivih x i y, čija se korelacija posmatra. Standardne devijacije za skup od n uzoraka i kovarijansa se izračunavaju kao

$$\sigma_{xy} = \frac{\sum x \cdot y}{n} - \frac{\sum x}{n} \cdot \frac{\sum y}{n}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n} - \left(\frac{\sum x}{n}\right)^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum y^2}{n} - \left(\frac{\sum y}{n}\right)^2}$$

Iz koeficijenta korelacije se kvadriranjem izračunava koeficijent determinacije . Obično apsolutne vrednosti koeficijenta korelacije iznad 0,7 odnosno koeficijenta determinacije (R^2) iznad 0,5 ukazuju na jaku povezanost dve promenljive.

Kada su identifikovani svi vedri dani za proleće i leto, posebno za radne dane posebno za dane vikenda, tipični dan predstavlja onaj dan koji ima najmanju sumu kvadrata odstupanja od prosečnog dana potrošnje za dati skup podataka. Konkretno, za svaki sat u toku dana uzima se skup vrednosti opterećenja prikupljenih tokom svih radnih dana tog godišnjeg doba (npr. za 30 radnih dana, dobija se 30 vrednosti opterećenja za jedan sat ujutru). Na osnovu ovih vrednosti izračunava se prosek, koji predstavlja srednju vrednost opterećenja u konkretnom satu. Ovaj postupak se ponavlja za svaki sat u periodu od 0 do 24 časa, čime se dobija kriva prosečnog dana u smislu opterećenja. Na ovaj način dobijen je fiktivni prosečni dan na osnovu dobijenih podataka, koji služi kao referenca za odabir stvarnog dana čiji je profil opterećenja njemu najpribližniji, i taj realni dan se koristi u proračunima. Na slikama ispod prikazani su tipični dijagrami za proleće (*Slika*) i leto (*Slika*) pri čemu je levo radni dan, a desno dan vikenda. Crnom bojom prikazan je fiktivni prosečni dan za tu kategoriju, koji je poslužio kao referentna vrednost prilikom računanja kvadrata odstupanja na sledeći način:

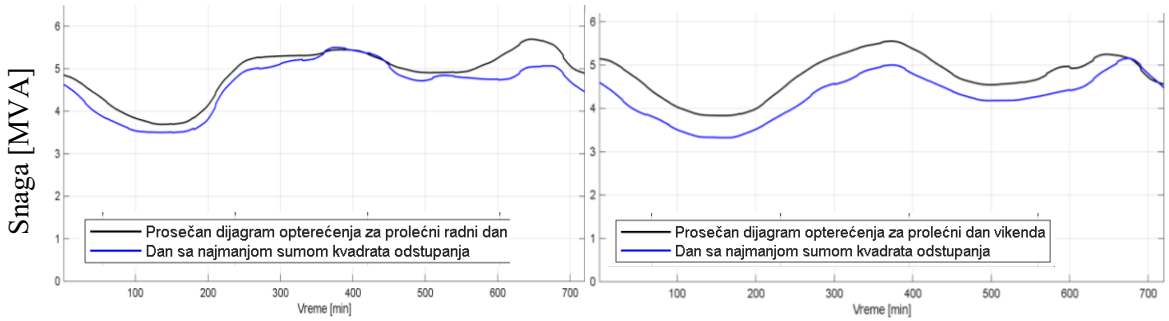
$$V_k = \sum_{i=1}^{24} (x_{ki} - \bar{x}_i)$$

Gde je:

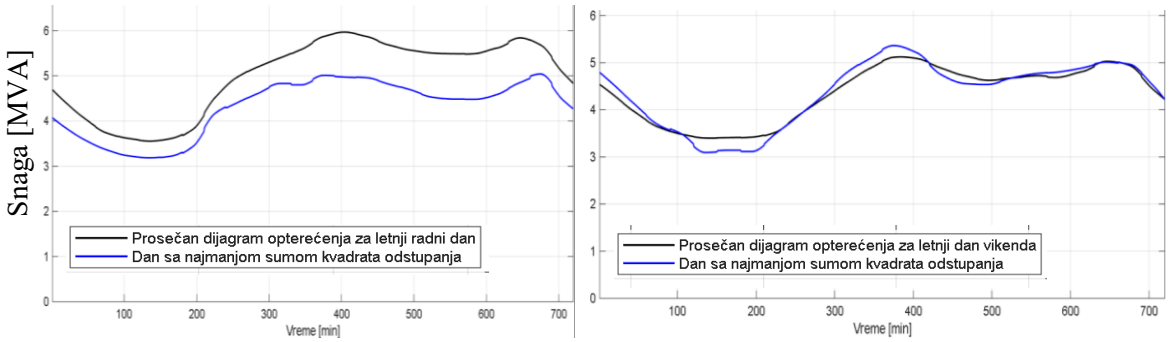
- V_k- suma kvadrata odstupanja za dan k, $k = 1,2 \dots 10$
- x_{ki}- opterećenje za sat i u danu k,
- $\bar{x}_i$- opterećenje u satu i u toku fiktivnog prosečnog dana
-

Da bi tipičan dan bio kompletiran bilo je potrebno i odrediti temperaturu ambijenta. S obzirom da temperatura ambijenta, nakon opterećenja transformatora, predstavlja drugi dominantan

uticaj na zagrevanje transformatora, proračunata je za najkritičniji period godine, što je period leta. Iz skupa podataka koji odgovara periodu leta, izdvojen je prosečan dan koji se dobija tako da se za svaki sat u toku dana za ceo posmatrani period odredi prosečna vrednost (za 1h za ceo posmatrani period leta se odredi prosečna vrednost, zatim za 2h,3h,.....,23h).



Slika 8 – Tipični dnevni dijagram potrošnje u proleće, radni dan (levo) i dan vikenda (desno)



Slika 9 – Tipični dnevni dijagram potrošnje u leto, radni dan (levo) i dan vikenda (desno)

2.3 Uticaji na dodatno zagrevanje transformatora

Pored dva dominantna uticaja koji utiču na zagrevanje transformatora (temperatura ambijenta i strujno opterećenje transformatora), potrebno je uvažiti i dodatne faktore koji utiču na zagrevanje transformatora. To su uticaj iradijacije i uticaj varijacija napona.

2.3.1 Uticaj iradijacije na dodatno zagrevanje transformatora

Zagrevanje transformatora nastaje kao posledica kombinacije unutrašnjih i spoljašnjih izvora toplote. Unutrašnji izvori toplote nastaju usled gubitaka u bakarnim provodnicima i u feromagnetnom jezgru transformatora, dok su spoljašnji izvori toplote posledica sunčevog zračenja. Na zagrevanje transformatora dominantno utiču unutrašnji izvori toplote, međutim na lokacijama koje imaju veliki broj sunčanih dana u toku godine preporuka je uvažiti i uticaj dodatnog zagrevanja usled solarnog zračenja. Prema standardu [1], metode koje se koriste za proračun zagrevanja transformatora ne uzimaju u obzir uticaj solarnog zračenja kao spoljnog faktora zagrevanja, već je čitavo zagrevanje transformatora posledica unutrašnjih izvora toplote[4]. Uticaj solarnog zračenja na dodatno zagrevanje transformatora se može uvažiti na sledeći način:

$$P_s[t] = c \cdot A_{tr} \cdot I_r[t] \text{ [4]}$$

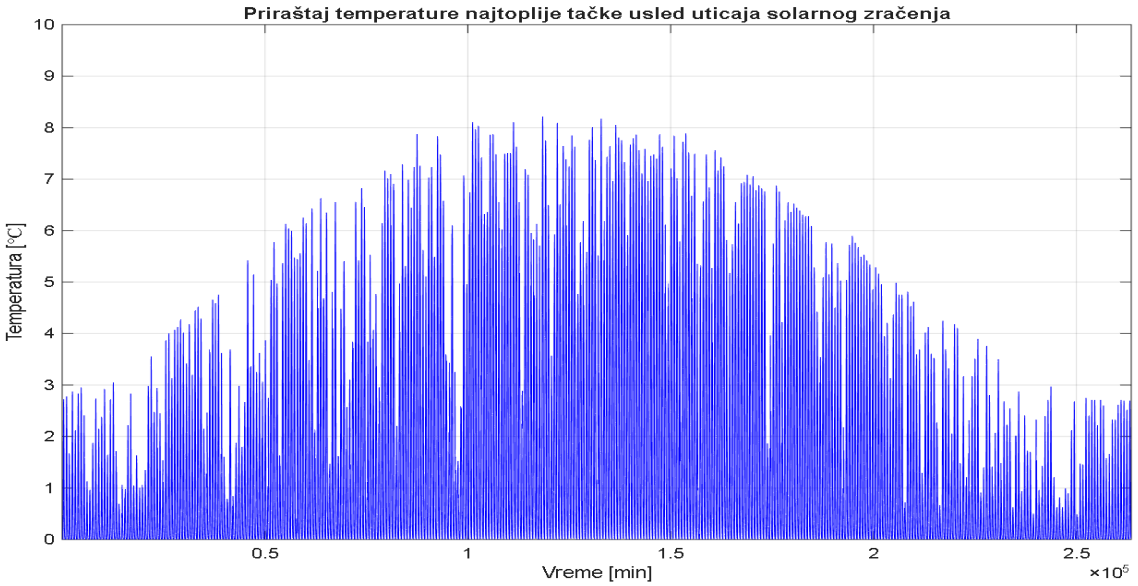
Pri čemu je P_s snaga sunčevog zračenja koja dospeva do površine transformatora, c faktor emisivnosti, A_{tr} efektivna površina transformatora i I_r iradijacija.

Za proračun uticaja solarnog zračenja na dodatno zagrevanje transformatora pretpostavlja se da je transformator na otvorenom i da je ceo dan izložen suncu, pri čemu ima južnu orijentaciju u odnosu na transformatorsku stanicu. Faktor emisivnosti predstavlja parametar koji zavisi od materijala i boje površine i određuje koliku količinu toplotnog zračenja telo emituje ili apsorbuje u poređenju sa idealnim crnim telom.

Efektivna površina transformatora odnosi se na gornju površinu transformatora, odnosno na površinu koja je paralelna sa horizontalnom površinom tla [4]. Za efektivnu površinu preko koje se uzima uticaj solarnog zračenja, usvojena je trostruka površina gornje površine transformatora, koja se smatra stacionarnom u odnosu na dnevno i sezonsko kretanje Sunca. Dakle, ideja se zasniva na tome da se čitav transformator predstavi kao horizontalna površina, i da se zatim posmatra uticaj ukupne horizontalne iradijacije na tu površinu. Ovakav pristup izračunavanju efektivne površine je konzervativan i služi za procenu uticaja solarnog zračenja na dodatno zagrevanje transformatora. Za detaljniju analizu ovog uticaja potrebno je uvažiti i uglove kojima se opisuje kretanje Sunca u odnosu na horizont. Za dimenzije koje su korišćene za proračun gornje površine transformatora korišćene su, u nedostatku konkretnih podataka, tipične vrednosti za dimenzije transformatora, gde je za dimenziju širine usvojeno tri metra, dok je za dimenziju dužine usvojeno pet metara. Efektivna površina transformatora u ovom slučaju iznosi 45 m². Za faktor emisivnosti je usvojeno c = 0.75, tj. pretpostavka je da je transformator sive boje. Iradijacija I_r predstavlja ukupnu horizontalnu iradijaciju koja je ozračena na površinu transformatora. Normalizovanjem jednačine za snagu sunčevog zračenja koja dospeva do površine transformatora u odnosu na ukupne naznačene gubitke u transformatoru i uvrštavanjem u sistem diferencnih jednačina dobija se izmenjena jednačina koja uvažava uticaj solarnog zračenja na dodatno zagrevanje transformatora:

$$D\theta_o = \frac{Dt}{k_{11}\tau_o}\left[\left(\frac{1+K^2R}{1+R}+\frac{P_s}{P_{Cu,R}+P_{Fe,R}}\right)^x \cdot \Delta\theta_{o,r} - (\theta_o - \theta_a)\right]$$

Da bi se video koliki je doprinos uticaja solarnog zračenja na dodatno zagrevanje transformatora, izvršen je proračun temperature najtoplije tačke namotaja transformatora za slučaj uvažavanja solarnog zračenja, a zatim je određen priraštaj izračunate temperature najtoplije tačke u odnosu na slučaj kada dodatno zračenje nije uzeto u obzir. Proračun temperature najtoplije tačke namotaja koji uvažava dodatno solarno zračenje izvršen je za celu godinu. Na sledećoj slici prikazan je priraštaj temperature najtoplije tačke namotaja transformatora. Sa slike se može videti da za slučaj uvažavanja uticaja dodatnog zagrevanja usled iradijacije, u odnosu na slučaj kada ovaj uticaj nije uzet u obzir, priraštaj temperature najtoplije tačke namotaja dostiže oko 8 °C. S obzirom na činjenicu da transformator stari dva puta brže pri povećanju temperature najtoplije tačke od 6 °C, zaključuje se da uticaj dodatnog zagrevanja usled iradijacije ima značajniji uticaj na starenje transformatora, pa će iz tog razloga biti uvažen u daljim proračunima.



Slika 10 – Priraštaj temperature najtoplije tačke namotaja usled uticaja solarnog zračenja na dodatno zagrevanje transformatora

2.3.2 Uticaj varijacija napona na dodatno zagrevanje transformatora

Varijacije napona u normalnom pogonu javljaju se kao posledica različitih uticaja u elektroenergetskom sistemu i predstavljaju odstupanje napona od njegove nominalne vrednosti. Najčešći faktori koji utiču na varijacije napona jesu nagla promena opterećenja, proizvodnja iz distribuiranih izvora energije, višak ili nedostatak reaktivne snage, trenutna topologija mreže itd.

Varijacije napona imaju direktan uticaj na zagrevanje transformatora. Naime, pri nižem naponu zbog konstantne snage efektivna vrednost struje raste, dok pri višem naponu efektivna vrednost struje opada. Kako je zagrevanje transformatora dominantno određeno gubicima u namotajima koji su proporcionalni kvadratu efektivne vrednosti struje, svako povećanje efektivne vrednosti struje usled smanjenog napona dovodi do većeg zagrevanja, a samim tim i do ubrzanog starenja izolacije.

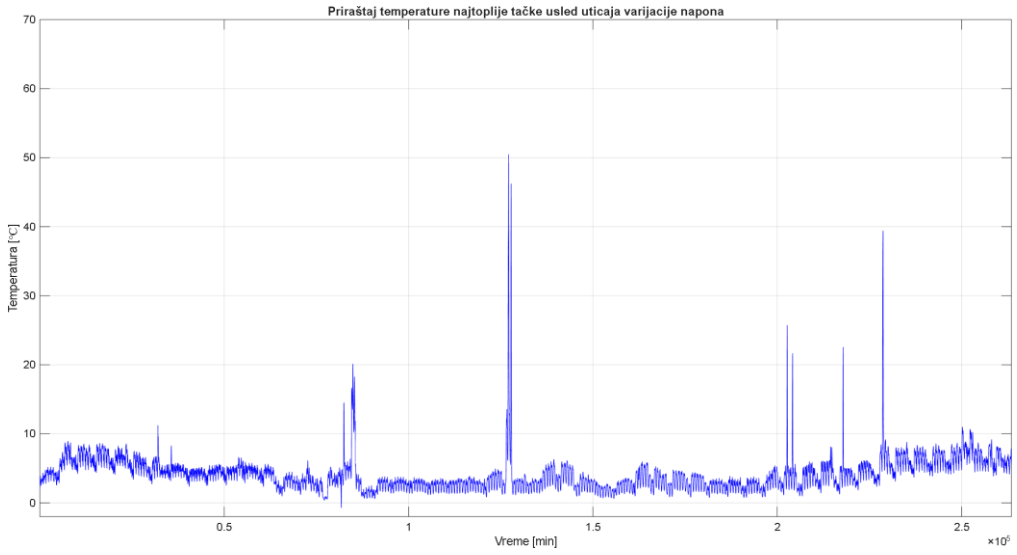
Pored uticaja na gubitke u namotajima, varijacije napona utiču i na promene u gubicima u gvožđu, jer su oni direktno zavisni od kvadrata napona. Stoga je prilikom proračuna gubitaka neophodno uvažiti uticaj varijacija napona kako na gubitke u namotajima, tako i na gubitke u gvožđu. Ovaj uticaj se u matematičkom modelu diferencnih jednačina uvažava na sledeći način:

$$D\theta_o = \frac{Dt}{k_{11}\tau_o}\left[\left(\frac{A^2+K^2R}{A\cdot(1+R)} + \frac{P_s}{P_{Cu,R}+P_{Fe,R}}\right)^x \cdot \Delta\theta_{o,r} - (\theta_o - \theta_a)\right]$$

Gde je: $A = (\frac{U}{U_n})^2$.

Da bi se prikazao uticaj varijacija napona na dodatno zagrevanje transformatora, na narednoj slici dat je priraštaj temperature najtoplije tačke namotaja za slučaj kada su varijacije napona uzete u obzir u odnosu na slučaj kada je napon konstantan i jednak nominalnom. Varijacije

napona koje su korišćene u proračunu odnose se na varijacije na sekundarnim sabirnicama transformatora.



Slika 11 – Priraštaj temperature najtoplije tačke namotaja usled varijacije napona

Sa slike 8. se može videti da, ako se zanemare pikovi koji su posledica preuzimanja opterećenja iz susednih trafostanica, je uticaj varijacija napona značajan i kreće se u opsegu 2-8 stepeni, odakle se može zaključiti da je ovaj uticaj opravdano uključiti u proračun.

3 KONAČNI REZULTATI PRORAČUNA

U tabeli ispod prikazane su konačne dobijene vrednosti maksimalne moguće snage solarnih elektrana koje se mogu priključiti na konzumno područje razmatranog transformatora sa aspekta termičkog zagrevanja. Minimalna vrednost snage solarnih elektrana, koja je najkritičnija i treba se posmatrati kao konačna za ovu analizu, dobija se za radni dan u toku leta, i iznosi 35,88 MW. Iz tabele se takodje može videti da uvaženi uticaji koji se odnose na dodatno zagrevanje transformatora, usled varijacije napona i iradijacije, smanjuju kapacitet mogućih solarnih elektrana u konzumnom području za 3-4 MW, pa se iz tog razloga ne mogu zanemariti. Procenjene instalisane snage solarnih elektrana neznatno se razlikuju u periodu sezone proleća i leta, odakle se takodje može potvrditi opravdanost da se u analizi posmatra i prolećna sezona. Dodatno, postoje razlike radnog dana u odnosu na dan vikenda koje su takve da je instalisana snaga za konzumno područje analiziranog urbanog tipa nešto veća u danima vikenda za letnji deo sezone, dok se u proleće ima obrnut slučaj, odnosno vikendom se ima nešto manji kapacitet.

Tabela II – Maksimalna snaga solarnih elektrana koje se mogu priključiti na konzumnom području analiziranog transformatora 110/21/10,5 kV/kV/kV sa aspekta termičkog zagrevanja

	Dan	Proleće [MW]	Leto [MW]
Bez dodatnih uticaja	Radni dan	41,19	39,94
	Vikend	40,81	40,32
Uticaj varijacija napona i iradijacije	Radni dan	37,22	35,88
	Vikend	37,06	36,39

4 ZAKLJUČAK

Analizirana je maksimalna snaga solarnih proizvodnih jedinica koje se mogu priključiti na jedan realan transformator 110/21/10,5 kV/kV/kV sa stanovišta termičkih ograničenja. Na osnovu dostavljenih podataka formirani su tipični dijagrami potrošnje za letnju i prolećnu sezonu, kao i za radni dan i dan vikenda. Na ovaj način uzet je konzervativniji pristup, kojim se ostaje na strani sigurnosti jer se u razmatranom periodu pored očekivano najviših temepratura ambijenta imaju i najviše vrednosti iradijacije. Kada bi se posmatrao period na nivou cele godine i na osnovu toga donosio zaključak, rezultat metodologije bi gotovo sigurno ugrozio starenje transformatora tokom letnjeg perioda na račun termičkog rasterećenja u zimskom periodu.

Opisanom metodologijom određuje se maksimalna snaga koja se može priključiti na transformator posmatrana agregirano, sa mestom priključenja na sekundarnim sabirnicama transformatora. Postavljeni kriterijum je takav da se dozvoljava povećanje instalisane snage sve dok ona ne dovodi do ubrazanog starenja transformatora na nivou jednog tipičnog dana. Minimalna vrednost snage solarnih elektrana, koja je najkritičnija i treba se posmatrati kao konačna za ovu analizu, dobija se za radni dan u toku leta, i iznosi 35,88 MW. Ipak, treba napomenuti da ovakva analiza sagledava samo termičke aspekte i ne može biti zamena za studiju o priključenju elektrane na sistem. Pri tome, Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije [5] definiše da je maksimalna vrednost koja se može preneti kroz transformator iz distributivnog u prenosni sistem 16 MW.

Metodologija se u osnovi bazira na standardu IEC 60076-7. Dodatno u odnosu na standard, kroz formirani model diferencnih jednačina uvaženi su uticaji zagrevanja usled iradijacije i promene napona. Promena napona posmatrana je prvobitno kao posledica varijacija u potrošnji. Pokazano je da su ovi uticaji značajni, i ne mogu se zanemariti (uvažavanjem ovih parametara dobija se promena u procenjenoj instalisanoj snazi za reda oko 1 - 2 MW naniže).

Pokazano je da se procenjene instalisane snage malo razlikuju u periodu sezone proleća i leta. Dodatno postoje razlike radnog dana u odnosu na dan vikenda koje su takve da je instalisana snaga za konzumno područje analiziranog urbanog tipa nešto veća u danima vikenda.

LITERATURA

[1] Standard IEC 60076-7 Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers, 2018, IEC
[2] PV GIS baza (Photovoltaic Geographical Information System, European Commission – Joint Research Centre, JRC), https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools,
[3] Analiza priključenja proizvodnih jedinica na 35 kV naponskom nivou, D. Vukotić, M. Dilparić, J. Dabić, DOI: 10.46793/CIGRE36.1810V
[4] B. Gorgan, P. V. Notingher, J. M. Wetzer, H. F. A. Verhaart, P. A. A. F. Wouters, A. van Schijndel, „Influence of Solar Irradiation on Power Transformer Thermal Balance“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 6; December 2012
[5] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, *"Sl. glasnik RS", br. 40/2021, 35/2023 i 94/2024 - dr. zakon,* https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-koriscenju-obnovljivih-izvora-energije.html