

TERMIČKI MONTORING ENERGETSKIH ULJNIH TRANSFORMATORA BAZIRAN NA PRIMENI DETALJNOG DINAMIČKOG TERMO-HIDRAULIČKOG MODELA

THERMAL MONITORING OF LIQUID IMMERSSED POWER TRANSFORMERS BASED ON DETAILED DYNAMIC THERMAL-HYDRAULIC MODEL

Marko NOVKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija
Patrick PICHER, HYDRO-QUÉBEC, Kanada
Federico TORRIANO, HYDRO-QUÉBEC, Kanada
Zoran RADAKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Velika masa i posledično velika toplotna inercija energetskih uljnih transformatora (ET) daje mogućnost da se oni optereće preko naznačene snage. Ova mogućnost predviđena je i IEC standardom 60076-7, i od praktičnog je značaja pri kratkotrajnim cikličnim preopterećenjima transformatora ili u slučaju kada transformator treba da preuzme opterećenje nekog drugog transformatora koji je ispao iz pogona. U ovakvim situacijama od ključne je važnosti sprečiti da temperature kritičnih delova transformatora pređu dozvoljene vrednosti, kako ne bi došlo do kvarova usled pojave mehurova vazduha u ulju ili ubrzanog starenja izolacije.

Kako bi terećenje transformatora iznad nominalne snage bilo bezbedno, neophodno je proračunati promenu karakterističnih temperatura tokom prelaznih termičkih procesa. Ustaljena praksa je da se za ovu namenu koriste jednostavni modeli bazirani na malom broju diferencijalnih jednačina, sa standardnim ili eksperimentalno određenim parametrima koji figurišu u jednačinama. Alternativni pristup je korišćenje detaljnog dinamičkog termo-hidrauličkog mrežnog modela (THMM), koji je baziran na detaljnom opisu fizičkih pojava u transformatoru. Za razliku od softvera CFD (*Computational Fluid Dynamics*), primena dinamičkog THMM, uz korišćenje standardnih računarskih resursa je realnost u aplikacijama u realnom vremenu. Primena dinamičkog THMM predstavlja optimalan kompromis između tačnosti i zahtevanih računarskih resursa, za izgradnju verne digitalne replike (*digital twin*) termičkog ponašanja transformatora na mreži.

Primena detaljnog THMM za ustaljena stanja danas postaje standard u praksi projektovanja ET. Sa druge strane, dinamički THMM je još uvek u ranijim fazama tehnološkog razvoja. Realno je očekivanje da se primena ovih modela u praksi proširi i u jednom trenutku zameni primenu pojednostavljenih modela ograničene tačnosti. Ovo će stvoriti nove mogućnosti u praksi eksploatacije transformatora, uz neophodno otklanjanje opasnosti od kvarova uzrokovanih prekomernim zagrevanjem.

U radu su prikazane osnove dinamičkog THMM, kao i njegova primena na dva transformatora: trofaznog 66 MVA i monofaznog 370 MVA, oba sa ONAF načinom hlađenja.

Ključne reči: Dinamičko termičko modelovanje, Termo-hidraulički model, Uljni energetski transformatori

ABSTRACT

The substantial mass and consequent thermal inertia of liquid immersed power transformers (LIPT) make it feasible to load them over nameplate rating. This possibility is considered in IEC standard 60076-7. This is of interest during short-time cyclic overloading or short-time emergency loading in the event of power network element outages. It is imperative to prevent exceeding critical temperatures in different parts of the transformer to prevent sudden failures caused by bubbling phenomena or accelerated ageing.

To ensure safe loading over nameplate rating, it is necessary to calculate the characteristic temperatures during transient thermal processes. Currently, ordinary differential equations are widely used to build dynamic thermal models, employing either standard or experimentally determined parameters in the models. The alternative approach is to use a detailed dynamic thermal hydraulic network model (THNM), which relies on a comprehensive description of the physical phenomena. Unlike computational fluid dynamics (CFD) calculations, the necessary computational resources render this method applicable in real-time applications. Consequently, a detailed dynamic THNM emerges as an optimal solution in developing a real-time applicable transformer digital twin, affording a high-fidelity virtual replica of the transformer's thermal behavior.

The prevalence of detailed static THNM is on the rise in transformer design engineering practices, applicable to transformers constructed with conventional or emerging insulating materials. In contrast, dynamic THNM is still at an earlier stages of technology development. Realistic expectation is that its application will grow and complement or even replace simplified equations of lower accuracy. A final effect is an improvement of LIPT load ability, with minimum failure risk caused by overheating during increased load.

The paper presents the basics of this advancement and showcases its application on a 66 MVA three-phase transformer and a 370 MVA single-phase transformer, both ONAF cooled.

Key words: Dynamic thermal modelling, Liquid-immersed power transformers, Thermal hydraulic network model

Marko Novković, Zoran Radaković Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Laboratorija 89, 11000 Beograd, tel: 011 3218 339, novkovic@etf.rs, radakovic@etf.rs;
Patrick Picher, Federico Torriano HYDRO-QUÉBEC, Quebec, Canada, picher.patrick@hydroquebec.com,
federico.torriano@hydroquebec.com

1. UVOD

Elementi elektroenergetskog sistema su pod sve većim opterećenjem koje je posledica konstantnog rasta potrošnje i promene strukture potrošača, sa sve većim udelom distribuiranih izvora električne energije i uređaja energetske elektronike. Ovo stvara nove izazove u održavanju postojeće infrastrukture koja je u pogonu već dugi niz godina. Dozvoljena vremena za isključenje iz pogona, zarad redovnog održavanja, sve su kraća, a termini između njih postaju sve duži. Zbog toga rastu izazovi u održavanju elektroenergetskog sistema i obezbeđenju njegovog pouzdanog rada. To je dovelo do strateškog interesa za razvoj alata i metoda za optimizaciju procesa održavanja i praćenja stanja elemenata sistema u realnom vremenu tzv. pravljenje digitalne replike (*digital twin*).

Energetski transformatori (ET) predstavljaju jedan od najznačajnijih i najskupljih elemenata elektroenergetskog sistema. Njihova naznačena snaga, određena za slučaj normalnog cikličnog opterećivanja, definiše i propusnu moć cele transformatorske stanice. Zbog svoje velike mase i posledično velikog toplotnog kapaciteta, ET je moguće kratkotrajno preopteretiti iznad naznačene vrednosti. Ova mogućnost predviđena je i važećim IEC standardom [1], pri čemu se razlikuju slučajevi dugoročnog cikličnog i kratkotrajnog preopterećenja. Kratkotrajna preopterećenja mogu, takođe, biti ciklična ili urgentna, kada u kriznim situacijama transformator treba da preuzme opterećenje nekog drugog transformatora koji je ispaao iz pogona. Zajedničko za sve tipove preopterećenja je da se kratkotrajno žrtvuje životni vek transformatora. Za slučaj planskih cikličnih opterećenja preko naznačene snage transformatora, ukupno relativno starenje na dužem periodu treba da bude ispod jedinične vrednosti (relativno starenje ima jediničnu vrednost pri nominalnoj vrednosti temperature najtoplije tačke izolacije i sadržaja vlage, pri čemu ove vrednosti zavise od primenjene klase izolacije). U slučajevima urgentnih preopterećenja racionalna je i odluka da se izvrši izvesno žrtvovanje životnog veka. U ovakvim, realnim situacijama jedino praktično ograničenje je da temperature kritičnih delova transformatora moraju biti ispod dozvoljene vrednosti, kako ne bi došlo do nastanka kvara usled pojave mehurova vazduha u ulju ili trenutne degradacije izolacije usled previsokih temperatura, [2]. Kako bi se opterećivanje transformatora preko naznačene vrednosti sprovedo na bezbedan način, neophodna je upotreba dinamičkih termičkih modela za određivanje temperature kritičnih delova transformatora tokom termičkih prelaznih procesa. Za ovu namenu najčešće se koriste modeli objavljeni u standardima za opterećivanje transformatora koje objavljuju međunarodne organizacije, [1] ili [3]. Ovi modeli (u daljem tekstu označeni kao JM – jednostavni modeli) bazirani su na malom broju diferencijalnih jednačina čiji parametri mogu biti tipski (objavljeni u standardima za različite tipove transformatora) ili određeni eksperimentalno na osnovu podataka izmerenih tokom standardnih ili proširenih fabričkih oglada ili tokom pogona za konkretni transformator. Tačnost ovih modela je veoma zavisna od parametara koji su korišćeni. Primena istog JM (istog skupa jednačina), sa parametrima određenim na različite načine, može dati značajno različite vrednosti dozvoljenog preopterećenja transformatora. Kao ilustracija praktične važnosti tačne procene temperatura kritičnih elementa transformatora je donošenje investicione odluke da se gradi nova transformatorska stanica (TS) ili da se u postojećoj TS menja postojeći ili dodaje novi transformator, usled porasta vršnog opterećenja preko naznačene snage postojećeg transformatora.

Alternativa pristupu termičkom modelovanju baziranom na JM je primena detaljnog dinamičkog termo-hidrauličkog mrežnog modela (THMM), zasnovanog na detaljnom opisu fizičkih pojava u transformatoru, kao i same konstrukcije transformatora. Dinamički THMM predstavlja međurešenje između JM, koje odlikuje mala tačnost i veoma velika brzina izvršavanja, i modela CFD (*Computational Fluid Dynamics*), koje odlikuje velika tačnost i veoma dugo vreme proračuna. Standardni računarski resursi, bez primene superkompjutera, omogućavaju izvršenje dinamičkog THMM u realnom vremenu tj. za 1 s računarskog vremena moguće je sračunati promene temperatura u transformatoru za više od 1 s u realnom vremenu. Ovo je ključna karakteristika, uz zadovoljavajuću

tačnost, koja dinamički THMM kvalifikuje za izgradnju praktično primenljive verne digitalne replike termičkog ponašanja transformatora na mreži. Iako daju veoma veliku tačnost, modele CFD nije ni izbliza moguće koristiti u realnom vremenu na danas dostupnim računarskim resursima. U [4] je objavljen podatak da bi za izvršenje 3D simulacije CFD termičkog ponašanja laboratorijskog modela, koji verno oslikava termičko ponašanje transformatora, tokom 30 minuta rada, bilo neophodno 30 dana rada na 464 procesorskih jedinica.

Primena koncepta THMM nije novina u inženjerskoj praksi. Detaljni THMM za ustaljena stanja danas postaje standard u praksi projektovanja ET. Dinamički THMM je još uvek u fazi razvoja i nije dostigao odgovarajući nivo tehnološke spremnosti kako bi ušao u široku primenu u elektroenergetskom sistemu. Nakon uspešnih inicijalnih testova na laboratorijskim modelima različite složenosti i nivoa sličnosti sa realnom geometrijom transformatora [5, 6], autori trenutno rade testiranje na realnim transformatorima u pogonu. U ovom radu daje se skup rezultata primena dinamičkog THMM na dva transformatora: trofazni 66 MVA i monofazni 370 MVA, oba sa ONAF načinom hlađenja. Za transformator 66 MVA pored se rezultati proračuna i merenja tokom rada transformatora na mreži. Za transformator 370 MVA pored se rezultati proračuna korišćenjem statičkog i dinamičkog THMM. Rezultati se pored za ustaljeno toplotno stanje transformatora u kratkom spoju, sa gubicima jednakim nominalnoj vrednosti ukupnih gubitaka (prvi deo standardnog fabričkog ogleđa zagrevanja). Imajući u vidu da se razvija nova digitalna replika termičkog ponašanja transformatora, bazirana na kompleksnom detaljnom dinamičkom THMM na mreži, navedeno poređenje za transformator 370 MVA predstavlja značajan korak njegove verifikacije, jer se rezultati proračuna pored sa rezultatima intenzivno primenjenog i proverenog modela za ustaljena stanja, [7, 8]. Motivacija za ovaj rad je upoznavanje šire stručne javnosti sa novim pristupom dinamičkom termičkom modelovanju ET i prikaz postepene verifikacije modela. Imajući u vidu i druge nedavne publikacije, poput [9], očekivanje je da će primena ovakvih modela u praksi rasti, kao i to da će u jednom trenutku potpuno zameniti postojeće JM. Sličan se slučaj već dogodio za detaljne stacionarne THMM, koji u praksi projektovanja prevladavaju klasične proračunske metode zasnovane na empirijskim pravilima.

2. KONCEPT DETALJNOG DINAMIČKOG THMM-a

Konstantan proces digitalizacije, kao i potreba za optimizacijom načina upotrebe postojeće opreme (*asset management*), planiranja i donošenja kapitalnih odluka, nameće kao jednu od ključnih potreba izradu vernih digitalnih replika. U slučaju ET za digitalnu repliku dinamičkih termičkih procesa najpogodnije je koristiti detaljni dinamički THMM, koji je dovoljno duboko baziran na fizičkim zakonima i konstrukciji samog transformatora, čime se eliminiše potreba za primenom JM čiji se parametri određuju eksperimentalno. Pristup koji se koristi kod JM nije pogodan jer pri eksploatacionim uslovima koji se razlikuju od opsega u kome su vršena kalibraciona merenja, po pravilu dolazi do velikih odstupanja izračunatih od stvarnih temperatura. To važi za različite metode određivanja parametara modela, kako klasičnih metoda za identifikaciju procesa, tako i savremenih pristupa preko mašinskog učenja (ML) i veštačke inteligencije (AI). Sa druge strane, detaljni dinamički THMM je moguće izvršavati u realnom vremenu na savremenim računarskim resursima standardnih performansi, dok to nije slučaj sa nešto tačnijim, ali mnogo složenijim modelima CFD.

Dok danas primena, već dokazanih, softvera baziranih na detaljnom THMM za ustaljena stanja, postaje standardna praksa u procesu projektovanja ET, dinamički THMM još uvek nisu dostigli neophodni nivo razvijenosti za primenu tokom rada transformatora na mreži. Postoje objavljene informacije o pilot projektima [9] primene detaljnih dinamičkih THMM, pogotovu njihove uprošćene varijante, zbog čega se može očekivati da će u bliskoj budućnosti ovi modeli postati rasprostranjeniji, samostalno u sistemima za monitoring, kao pomoć ili dopuna JM (npr. za tačnije određivanje parametara), a kao krajnji cilj i za donošenje odluka operatora mreže.

Za realizaciju dinamičkog THMM neophodni su detaljni podaci o konstrukciji transformatora (pregled dat u Tabeli 1). Ove podatke, posebno za starije transformatore, nije uvek moguće pribaviti. Zbog toga bi bilo korisno razviti mehanizam za deljenje neophodnog skupa podataka između proizvođača transformatora i korisnika. Ovaj proces je značajno jednostavniji ukoliko proizvođač tokom procesa projektovanja transformatora koristi softver baziran na detaljnom THMM za ustaljena stanja jer je ulazni skup konstruktivnih podataka za ovakav softver identičan onom potrebnom za dinamički THMM. Pored konstruktivnih podataka, neophodni su i podaci o opterećenju svakog namotaja, poziciji regulacione preklapke, stanju uključenosti radiatora/kompaktnih izmenjivača toplote, ventilatora i pumpi, kao i ambijentalni podaci (temperatura, jačina sunčevog zračenja, padavine, brzina i smer vetra) tokom rada transformatora na mreži. Ove podatke, korisnici mogu da obezbede postavljanjem senzora i monitoringom vrednosti.

Tabela 1 – Pregled ulaznih podataka potrebnih za THMM

<p>Namotaji</p> <ul style="list-style-type: none"> • Raspodela gubitaka po provodnicima • Tip namotaja (disk ili slojni), broj diskova, njihova pozicija i dimenzije • Pozicija i dimenzije kanala kroz koje protiče ulje • Podaci o provodnicima (tip i dimenzije), tip izolacije i njene dimenzije i termički parametri • Pozicija barijera za usmeravanje toka ulja (ukoliko postoje) • Tip izolacije između namotaja, njene dimenzije i parametri • Tip, dimenzije i parametri izolacije iznad i ispod namotaja, prema jarmu (ukoliko postoji) • Elementi za dodatni pad pritiska, koji služe da se reguliše raspodela protoka između namotaja (ukoliko postoje) 	<p>Jezgro</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gubici u jezgru • Oblik jezgra • Dimenzije jezgra • Način pakovanja limova, debljina i materijal izolacije između dva lima • Dimenzije i pozicija kanala za hlađenje • Dimenzije metalnih stezaljki za pričvršćenje jezgra
<p>Rashladni sistem</p> <ul style="list-style-type: none"> • Termički parametri rashladnog fluida • Broj rashladnih jedinica i njihov tip (radijatori ili kompaktni izmenjivači toplote) • Dimenzije, broj i pozicija elemenata rashladnog sistema • Ventilatori (ukoliko postoje) – tip, broj, pozicija i radne karakteristike • Pumpe (ukoliko postoje) – tip, broj, pozicija i radne karakteristike • Dimenzije i pozicija svih cevi 	<p>Sud</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gubici usled rasutog fluksa • Dimenzije • Dimenzije i parametri magnetnog ekrana i zida za redukciju buke • Pozicija i dimenzije mesta ulaska/izlaska ulja

Razvoj detaljnog dinamičkog THMM autori su započeli 2021. godine. Tokom prethodne tri godine, pređen je dug put od nastanka ideje, preko teorijskog razvoja i dokaza koncepta na laboratorijskim modelima, do prvih testova na realnim transformatorima. U ovom periodu objavljeno je nekoliko radova kojima su dokumentovane faze razvoja:

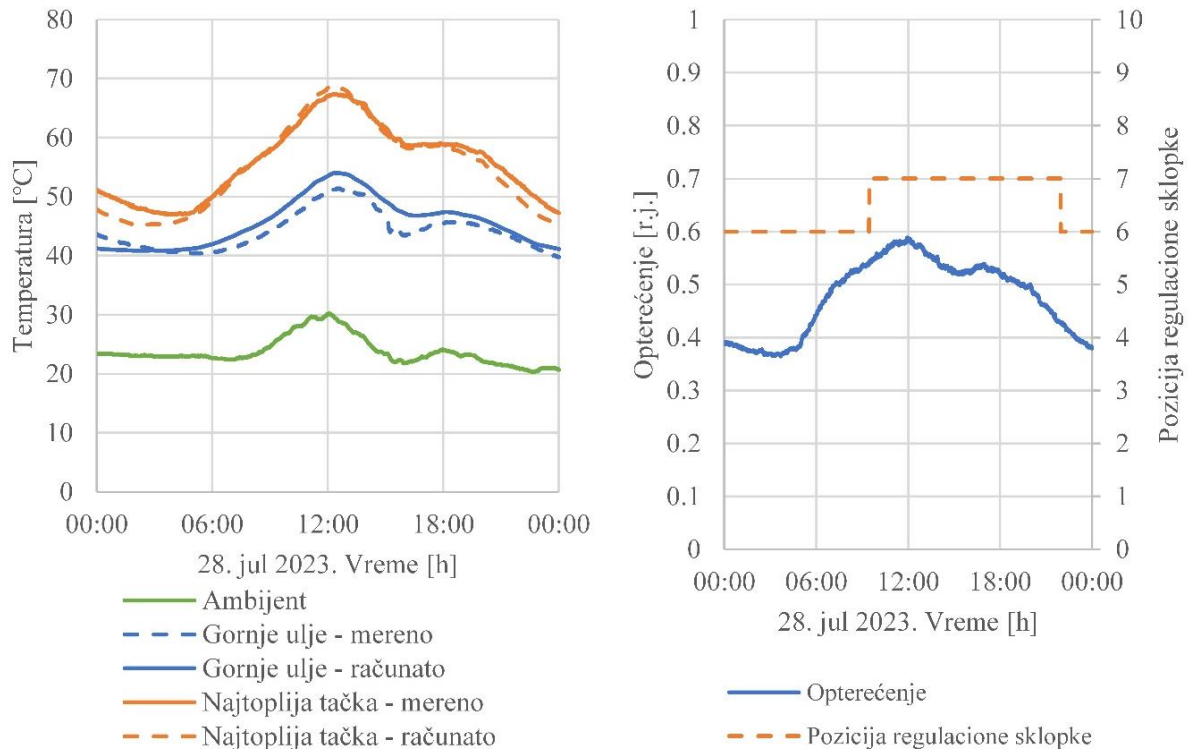
- Opis prednosti upotrebe sistema baziranog na protokolu MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) za prikupljanje ulaznih podataka tokom rada transformatora, [10]. Sistem omogućava bežičnu komunikaciju računara na kojem je pokrenut softver baziran na detaljnom dinamičkom THMM i sistema za akviziciju podataka na transformatoru.
- Potvrda koncepta dinamičkog THMM kroz termičko modelovanje jednostavne laboratorijske postavke bazirane na zatvorenoj termo-sifonskoj petlji, [5].
- Dalja razrada dinamičkog THMM-a za slučaj cik-cak tipa namotaja sa verifikacijom na primeru laboratorijskog modela koji je veoma sličan realnom transformatoru, [6, 11].
- Verifikacija modela kroz termičko modelovanje realnih transformatora nominalne snage 66 MVA i 370 MVA, [12].

3. TRANSFORMATOR SNAGE 66 MVA – RAD NA MREŽI

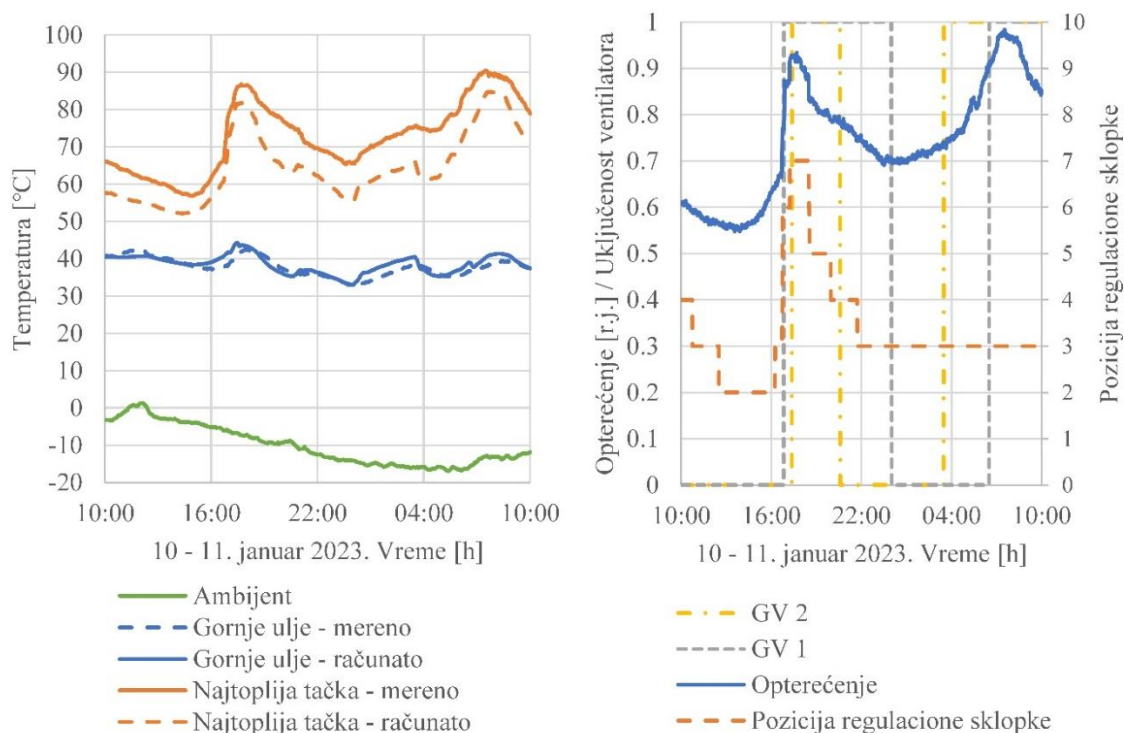
Softverom baziranim na detaljnom dinamičkom THMM simuliran je rad trofaznog ET naznačene snage 66 MVA na mreži. Za ovaj transformator postoje snimljeni rezultati merenja električnih i termičkih veličina tokom njegovog rada u mreži Hydro Quebec tokom 2023. godine. Na osnovu njih je moguće proveriti odziv modela pri različitim termičkim uslovima: 1) promenljivi dnevni dijagrami opterećenja (tokom normalnog rada ili u slučaju naglih skokova opterećenja); 2) promene u temperaturi ambijenta (ispod -20°C tokom zime i preko 30°C tokom leta); 3) promena pozicije regulacione preklopke (posledično i promena gubitaka); 4) promena načina hlađenja (ONAF 1/ONAF 2/ONAN). Transformator nominalno ima ONAF sistem hlađenja sa ukupno 14 radijatora, podeljenih u dva zasebna bloka. Prinudno strujanje vazduha obezbeđuje se sa šest ventilatora u svakom bloku

radijatora. Ventilatori u jednom bloku radijatora podeljeni su u dve grupe (u nastavku: grupa ventilatora 1 (GV1) i grupa ventilatora 2 (GV2)) od po tri ventilatora koje je moguće uključivati i isključivati (ONAF 1 – GV1 i GV2, ONAF 2 – GV1 ili GV2, ONAN – svi ventilatori isključeni).

Na Slikama 1 i 2 prikazano je poređenje rezultata dobijenih primenom dinamičkog THMM i rezultata merenja za dva dana tokom 2023. godine. Na Slici 1 prikazani su rezultati za jedan letnji dan (28. jul 2023. godine), tokom koga su sve vreme bili uključeni svi ventilatori (ONAF 1). Na Slici 2 prikazana su 24 časa tokom zime (od 10.00 č. 10. januara do 10.00 č. 11. januara 2023. godine), sa promenljivim hlađenjem. Ovaj period je malo pomenen kako bi se u periodu od 24 časa obuhvatila kompletna promena svih načina hlađenja. Tokom oba posmatrana dana dolazilo je do promene položaja regulacione preklapke.



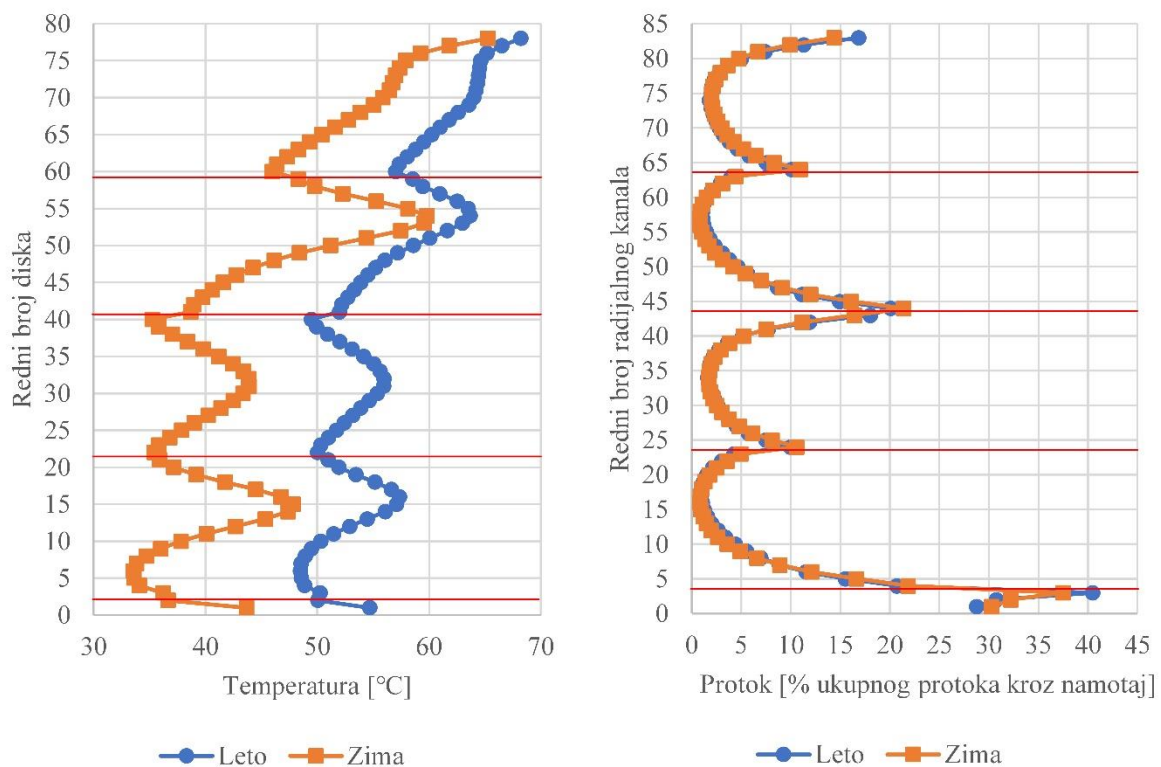
Slika 1 – Rezultati za letnji dan.



Slika 2 – Rezultati za zimski dan.

Na Slici 1 vidi se veoma dobro slaganje računatih i merenih vrednosti temperature gornjeg ulja i najtoplije tačke namotaja. U slučaju zimskog perioda (Slika 2), model daje veoma dobro poklapanje sa merenim vrednostima temperature gornjeg ulja, ali je računata temperatura najtoplije tačke namotaja nešto niža od merene. Ovde treba imati u vidu da je tokom zime temperatura ambijenta bila veoma niska (tokom posmatrana 24 časa najniža temperatura bila je $-16,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, a tokom meseca januara $-19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), što značajno utiče na viskoznost ulja, a posledično i na protok ulja kroz delove transformatora i na kraju temperaturu ulja i namotaja. Ovaj efekat je naročito izražen pri hlađenju prirodnim strujanjem.

Primena dinamičkog THMM nije ograničena samo na proračun veličina koje se uobičajeno mere na transformatorima (temperature gornjeg i donjeg ulja, temperature na mestu gde se očekuje pojava najtoplije tačke namotaja itd.), već daje globalnu raspodelu temperatura i protoka u celom transformatoru (do temperature pojedinačnih provodnika, temperature i protoka ulja u svim kanalima kroz koje ono struji, temperature pojedinih delova jezgra ili transformatorskog suda). Jedan takav primer prikazan je na Slici 3 gde je data promena temperature pojedinačnih diskova niskonaponskog namotaja (NN) po visini, kao i raspodela protoka (kao procenat ukupnog protoka kroz namotaj) u pojedinačnim radijalnim kanalima, za isti namotaj. Posmatrani namotaj je disk tipa i ima cik-cak konstrukciju (postoje aksijalni i radijalni kanali za hlađenje, kao i barijere za usmeravanje toka ulja). Ukupan broj diskova je 78 i podeljeni su u pet grupa sa istim usmerenjem ulja (broj diskova po grupama je: 2, 19, 19, 19 i 19). Vrednosti prikazane na Slici 3 su u trenutku kada je temperatura najtoplije tačke namotaja približno jednaka za letnji (u 12.00 č. 28. jula – opterećenje 0,59 r.j., temperatura ambijenta $30,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ i protok kroz namotaj $2,44\text{ m}^3/\text{s}$, hlađenje ONAF 2) i zimski dan (u 16.50 č. 10. januara – opterećenje 0,77 r.j., temperatura ambijenta $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ i protok kroz namotaj $2,22\text{ m}^3/\text{s}$, hlađenje ONAN).



Slika 3 – Promena temperature diskova po visini NN namotaja (slika levo) i raspodela protoka po radijalnim kanalima (slika desno). Crvenim linijama označene su pozicije barijera za usmerenje ulja

Iz rezultata na Slici 3 može se zaključiti da, iako je u slučaju zime opterećenje bilo veće, niska temperatura ambijenta (čak i sa isključenim ventilatorima) dovode to toga da je temperatura diskova u namotaju značajno niža. Ova pojava je i bila očekivana, ali zanimljivo je primetiti da se temperatura najtoplije tačke namotaja razlikuje veoma malo, dok je za ostale diskove ta razlika dosta veća. Sa slike desno vidi se da promena leto/zima nema veliki uticaj na raspodelu protoka po radijalnim kanalima. Ukupni protoci kroz namotaj bili su relativno bliski, pri radnim uslovima transformatora koji su se veoma razlikovali. Takođe, zanimljivo je primetiti kako se menja temperatura diskova u okviru jedne grupe sa istim usmerenjem ulja. Ako zanemarimo prvu grupu sa samo dva diska, u drugoj, trećoj i četvrtoj, najtopliji disk nije na vrhu grupe. Ovo je posledica relativno velikog broja kanala u jednoj grupi (20), pri čemu protok kroz radijalne kanale pri sredini postaje relativno mali. U slučaju pete grupe,

gubici u diskovima na vrhu su nešto veći, što za posledicu ima promenu profila temperature diskova u odnosu na grupe 2 – 4.

4. TRANSFORMATOR SNAGE 370 MVA – ZAGREVANJE U KRATKOM SPOJU

Na monofaznom autotransformatoru nominalne snage 370 MVA sa ONAF sistemom hlađenja izvršen je proširen skup oglada zagrevanja u odnosu na ogled zagrevanja predviđen standardom [13]. Proširenje obuhvata preopterećenje od 1,3 r.j. tokom 24 časa, zatim smanjenje opterećenja na 0,7 r.j. tokom naredna 24 časa, i na kraju kratkotrajno preopterećenje od 1,5 r.j. Ukupno trajanje eksperimenta je 60 časova. U ovom radu se prikazuju rezultati koji se odnose na početni deo oglada, koji je predviđen standardom [13] – zagrevanje transformatora sa kratko spojenim sekundarom, snagom gubitaka jednakom naznačenoj snazi ukupnih gubitaka u transformatoru. Poređenje rezultata dinamičkog THMM sa rezultatima merenja tokom dela proširenog oglada zagrevanja biće predmet narednih publikacija autora.

Prvi deo oglada simuliran je pomoću dva softvera bazirana na detaljnom THMM, jednog predviđenog za proračun temperatura u ustaljenim stanjima (statički proračun) i jednog predviđenog za proračun temperatura i tokom prelaznih procesa (dinamički proračun). Tokom izvođenja prvog dela oglada zagrevanja, struja mora biti veća od nominalne vrednosti kako bi ukupna snaga gubitaka bila jednaka naznačenoj snazi gubitaka (vrednost struje menjala se između 1,089 r.j. na početku oglada zagrevanja i 1,056 r.j., koliko je iznosila na kraju oglada – u trenutku dostizanja ustaljenog stanja). Kao ulaz za statički proračun iskorišćena je vrednost opterećenja na kraju prvog dela oglada (1,056 r.j.), a za dinamički proračun korišćena je tačna vrednost opterećenja u svakom trenutku. U Tabeli 2 prikazano je poređenje rezultata dobijenih pomoću ova dva softvera (kolona „Statik“ označava vrednosti dobijene pomoću softvera za ustaljena stanja, a kolona „Dinamik“ predstavlja vrednosti dobijene pomoću softvera za prelazne procese).

Tabela 2 - Poređenje temperatura dobijenih proračunom pomoću dva softvera bazirana na detaljnom THMM

		Statik	Dinamik	Razlika
NN namotaj	Ulazna temperatura ulja [°C]	38,49	38,64	0,15
	Izlazna temperatura ulja [°C]	78,14	78,17	0,03
	Temperatura najtoplije tačke [°C]	105,15	105,10	-0,05
	Protok [kg/s]	13,14	13,26	0,12
VN namotaj	Ulazna temperatura ulja [°C]	38,49	38,74	0,25
	Izlazna temperatura ulja [°C]	77,00	76,94	-0,06
	Temperatura najtoplije tačke [°C]	96,03	95,21	-0,82
	Protok [kg/s]	16,14	16,38	0,20
Rashladni sistem	Ulazna temperatura ulja [°C]	78,40	77,61	-0,79
	Izlazna temperatura ulja [°C]	37,87	37,91	0,04
	Protok [kg/s]	29,81	29,97	0,16

Na osnovu rezultata u Tabeli 2 može se zaključiti da ova dva softvera, iako oba bazirana na detaljnom THMM, ali sa značajno drugačijim načinom inkorporacije osnovnih fizičkih zakonitosti, ipak daju rezultate koji su veoma bliski. Kako je tačnost softvera za proračune u ustaljenim stanjima [7] potvrđena dugogodišnjom upotrebom u praksi projektovanja, ovo se može iskoristiti kao jedan vid potvrde rezultata koje daje novorazvijeni softver baziran na dinamičkom THMM. Naravno, konačna potvrda tačnosti ovog modela mora se dati na osnovu poređenja sa rezultatima merenja na transformatoru u pogonu, u uslovima promenljive temperature, kao što je prikazano u prethodnom poglavlju.

5. ZAKLJUČAK

U radu se prikazuje deo razvojnog procesa tačnijih modela termičkog ponašanja transformatora tokom prelaznih temperaturnih procesa, koji bi zamenili postojeće jednostavne modele ograničene tačnosti. Ovo predstavlja jednu od najvažnijih praktičnih komponenti realizacije opšteg koncepta upotrebe vernih digitalnih replika (*digital twin*), kao aktuelnijeg fokusa u transformatorskoj tehnici. Krajnji cilj upotrebe vernih digitalnih replika je optimizacija korišćenja postojećih resursa i planiranje proširenja transformatorskih stanica (zamena postojećih i/ili dodavanje novih transformatora, ili izgradnja potpuno novih transformatorskih stanica).

Optimalno rešenje za izgradnju digitalne replike, u smislu tačnosti i zahtevnih računarskih resursa, je primena dinamičkog THMM. U radu je prikazana ilustracija primene i poređenje rezultata primene razvijenog dinamičkog

THMM sa rezultatima merenja na trofaznom transformatoru snage 66 MVA u pogonu, u dva karakteristična radna režima (letnjem i zimskom). Druga ilustracija primene modela je data za fabrički ogled zagrevanja na monofaznom autotransformatoru snage 370 MVA, za koji je dato poređenje rezultata primene vrednosti koju daje dinamički THMM u stacionarnom stanju sa rezultatima koje daje softverski realizovan statički THMM, čija je tačnost ispitana kroz višegodišnju praksu primene u praksi projektovanja.

LITERATURA

- [1] IEC 60076-7, “Power transformers - Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power Transformers”, 2017.
- [2] Z. Radakovic, D. Kalic, “The effect of load cycle shape onto the permitted transformer loading”, Proceedings of the 33st Universities Power Engineering Conference, Edinburg, Velika Britanija, 1998, pp. 190-193.
- [3] IEEE C57.91, “IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators”, 2012.
- [4] F. Torriano; H. Campelo; M. Quintela, P. Labbé, P. Picher, 2018, “Numerical and experimental thermofluid investigation of different disc-type power transformer winding arrangements”, Int. J. Heat Fluid FL., **69**, pp. 62–72, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.11.007>.
- [5] M. Novkovic, Z. Radakovic, F. Torriano, and P. Picher, 2023, “Proof of the Concept of Detailed Dynamic Thermal-Hydraulic Network Model of Liquid Immersed Power Transformers”, Energies, **16(9)**, doi: <https://doi.org/10.3390/en16093808>.
- [6] . Radaković, M. Novković, P. Picher, M. Kirouac, F. Torriano, “A Contribution to the Concept of Dynamic Thermal Model of Liquid-Immersed Power Transformers based on detailed Thermal-Hydraulic Network Model”, CIGRE A2 Colloquium & ICTRAM, Split, Hrvatska, 2023.
- [7] <https://www.hostcalculus.com> (provereno: 09.05.2024.)
- [8] Z. Radakovic, M. Sorgic, 2010, “Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers”, IEEE Trans. Power Del., **25(2)**, pp. 790-802, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2033076>.
- [9] J. Raith, J. Gaugl, F. Belavić, “A Digital Twin for a Dynamic Prediction of Maximal Permissible Transformer Overloads”, CIGRE A2 Colloquium & ICTRAM, Split, Hrvatska, 2023.
- [10] A. Jovanović; M. Novković; S. Girard; P. Picher; Z. Radaković, “Primena MQTT protokola u sistemima za monitoring energetskih transformatora”, 13. Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem, Kopaonik, Septembar, 2022.
- [11] M. Novković, F. Torriano, P. Picher, Z. Radaković, “Application of Dynamic Detailed Thermal Hydraulic Model on a Transformer with zig-zag winding scale model”. U procesu recenzije, očekivano objavljivanje tokom 2024. godine.
- [12] P. Picher, F. Torriano, Z. Radaković, M. Novković, “Advancements in dynamic thermal modelling of power transformers: integrating detailed thermal hydraulic network models”, 2024 CIGRE Paris Session, Pariz, Francuska, Avgust 2024.
- [13] IEC 60076-2, “Temperature rise for liquid -immersed Transformers”, 2011.