



Toni Dropulić, dipl. ing.
Mladen Banović, dipl. ing.
Samir Keitoue, dipl. ing.
KONČAR-Institut za elektrotehniku d.d., Zagreb
tdropulic@koncar-institut.hr, mbanovic@koncar-institut.hr, skeitoue@koncar-institut.hr

INTELIGENTNO UPRAVLJANJE RASHLADOM TRANSFORMATORA SUSTAVOM MOTRENJA TRANSFORMATORA KONČAR TMS

SAŽETAK

Rashladni sustav transformatora toplinu nastalu u transformatoru prenosi u okolinu, čime se transformatoru omogućava stabilan i pouzdan rad. Klasično upravljanje rashladnim sustavom uljnih transformatora temelji se na upravljanju termoslikom i kontaktnim termometrom. U sustavu motrenja transformatora Končar TMS integrirano je inteligentno upravljanje rashladom transformatora. Opisan je rad sustava upravljanja hlađenjem i usporedno su prikazani rezultati testiranja inteligentnog upravljanja hlađenjem i termoslike na modelu transformatora.

Ključne riječi: inteligentno upravljanje, rashladni sustav, transformator, temperatura ulja, temperatura namota

INTELLIGENT TRANSFORMER COOLING CONTROL BY TRANSFORMER MONITORING SYSTEM KONČAR TMS

SUMMARY

Transformer cooling system transfers the heat generated in the transformer to the surrounding, which provides stable and reliable operation of the transformer. Standard cooling control of oil-immersed transformers is based on winding temperature indicator and oil temperature indicator. Intelligent cooling control is integrated in Končar TMS transformer monitoring system. Operation of intelligent transformer cooling control is described, as well as parallel results of testing intelligent cooling control and winding temperature indicator on a transformer model.

Key words: Intelligent control, cooling system, transformer, oil temperature, winding temperature

1. UVOD

Upravljanje rashladom transformatora treba biti efikasno i dostatno da transformatoru omogući stabilan rad pri svim predviđenim pogonskim opterećenjima i pri svim temperaturama okoline. Upravljanje pomoću klasičnih sustava upravljanja rashladom temelji se na uključenju/isključenju pojedinih grupa hlađenja ovisno o diskretno postavljenim temperaturnim granicama za trenutnu temperaturu ulja u najvišem sloju i trenutnu temperaturu najtoplije točke namota (hot spot). Sustavom inteligentnog upravljanja rashladnim sustavom unutar sustava motrenja transformatora Končar TMS upravljanje rashladom se temelji na predviđanju temperature najtoplije točke namota i prema tome se aktivira potrebna rashladna snaga. Potrebno je naglasiti kako je sustav moguće primijeniti na svim rashladnim

sustavima transformatora s prisilnim hlađenjem (pumpe i/ili ventilatori). Provedena su testiranja različitih vrsta sustava upravljanja rashladnim sustavom na modelu transformatora te je dan paralelni prikaz i komentar dobivenih rezultata.

2. POSTOJEĆI UREĐAJI ZA UPRAVLJANJE RASHLADNIM SUSTAVOM TRANSFORMATORA

2.1. Termoslika

Termoslika je uređaj koji upravlja rashladom transformatora uključivanjem potrebne rashladne snage na osnovi određivanja temperature najtoplije točke namota i diskretno postavljenih granica temperature najtoplije točke namota za uključenje pojedinih grupa hlađenja. Temperatura se može određivati na dva načina, ovisno o izvedbi termoslike, koja može biti analogna i digitalna. Razlikuju se u načinu određivanja temperature najtoplije točke namota. Kod analogne izvedbe temperatura najtoplije točke namota se određuje protjecanjem struje razmjerne struji namota transformatora kroz otpornik čija je vremenska konstanta jednaka vremenskoj konstanti stvarnog namota transformatora i mjerenjem temperature na tom otporniku. Kod digitalne termoslike se numerički računa temperatura najtoplije točke namota pomoću termičkog modela transformatora. Ulazni parametri modela su podaci transformatora, faktor opterećenja i temperature ulja. Na osnovu diskretno podešenih iznosa temperatura najtoplije točke namota i procijenjene temperature najtoplije točke namota uključuje se potreban broj hladnjaka. Kod većih transformatora, prva grupa hlađenja se uključuje direktno s upakčanjem transformatora na mrežu, kako bi se odvela toplina nastala kod praznog hoda i pri malim opterećenjima, a ostale grupe hlađenja se uključuju po postavljenim granicama. Pritom se kod pojedine temperaturne granice u karakteristiku ubacuje i histereza, odnosno temperaturna razlika koja se za isključenje obično postavlja za 3% od temperaturnog opsega termoslike niže od temperature uključivanja. Također, termoslika ima mogućnost alarmiranja kada temperatura najtoplije točke namota prijeđe postavljenu granicu (npr. pri temperaturi 120 °C) te mogućnost iskapčanja transformatora kod određene temperature (npr. 160 °C).

2.2. Kontaktni termometar

Rad kontaktnog termometra se temelji na uključivanju pojedinih grupa hlađenja po diskretno postavljenim temperaturnim granicama ulja u džepu transformatora (pri vrhu kotla transformatora). Kontinuirano se mjeri temperatura ulja u džepu, te ukoliko iznos prijeđe granicu postavljenu za uključivanje sljedeće grupe hlađenja, daje se nalog za njeno uključivanje. Također, kontaktni termometar posjeduje mogućnost alarmiranja (npr. kod temperature ulja 90 °C), te iskapčanja transformatora (npr. kod 100 °C).

2.3. Paralelan rad postojećih uređaja za upravljanje rashladnim sustavom hlađenja transformatora

Termoslika i kontaktni termometar rade na energetske transformatorima paralelno te na taj način čine redundanciju i povećavaju pouzdanost rada rashladnog sustava, a time i transformatora. Granice termoslike i kontaktnog termometra je potrebno postaviti tako da ne dođe do interferencije u radu dvaju sustava. Interferencija bi se očitovala u tome što bi jedan uređaj uključio grupu hlađenja, a drugi bi ga ubrzo potom isključio, i obratno. Bitno je naglasiti kako oba ova sustava upravljanja rashladnim sustavom djeluju na posljedicu zagrijavanja, odnosno porast temperature ulja, dok se na uzrok (struja) ne djeluje.

3. INTELIGENTNO UPRAVLJANJE RASHLADNIM SUSTAVOM TRANSFORMATORA

Inteligentno upravljanje rashladnim sustavom transformatora je sustav koji se priključuje paralelno postojećim sustavima upravljanja rashladnim sustavom transformatora te svojim djelovanjem dopunjuje njihov rad.

Rad sustava se temelji na termičkom modelu i podacima o transformatoru. Termički model transformatora može biti prema standardima [1], [2] i [3], ili prema tvorničkim modelima. Algoritmom se na temelju praćenih veličina bitnih za termičko stanje transformatora određuje potrebna snaga rashladnog sustava. Pritom je ključna razlika pred postojećim sustavima upravljanja hlađenjem to što se rashladna snaga određuje unaprijed. Ta razlika u konceptu rada pred postojećim sustavima je upravo u termičkom

modelu transformatora pomoću kojeg se određuje temperatura najtoplije točke namota za definirani period vremena unaprijed.

Na osnovu ovako izračunate temperature najtoplije točke namota i graničnih temperatura termoslike zadaje se intermitirani pogon pojedinih grupa hlađenja. Prednost ovakvog rada je u tome što se ne uključuje sljedeća grupa hlađenja kad temperatura dosegne definiranu granicu, već se uključuje znatno prije, ali s intermitencijom, čime se omogućava kontinuiran porast rashladne snage s kontinuiranim porastom zagrijavanja ulja. Tako se postižu manje temperaturne promjene unutar transformatora, što direktno smanjuje i disanje transformatora. Kod transformatora s otvorenim sustavom disanja na taj način je smanjen unos vlage i kisika u transformator, što smanjuje starenje izolacije transformatora. To također omogućava bolje hlađenje transformatora u svim prilikama, te omogućuje produljenje vremena trajanja eventualno potrebnog preopterećenja transformatora.

Ulazni podaci za algoritam su pritom:

- podaci transformatora bitni za izradu termičkog modela,
- temperature ulja gore i/ili dolje,
- faktor opterećenja transformatora,
- podešenja termoslike,
- stanje rashladnog sustava.

Za vremenski korak izračuna algoritma treba uzeti da bude jednak 1/10 najmanje vremenske konstante zagrijavanja ulja u transformatoru, što se kod velikih energetske transformatora ($S_n > 100 \text{ MVA}$) s OFAF tipom hlađenja oko 5 - 10 minuta.

Pored navedenih, inteligentno upravljanje rashladom raspolaže i sa sljedećim mogućnostima:

- održavanje podjednakog broja radnih sati hladnjaka na svim grupama hlađenja, što se postiže uključivanjem hladnjaka po poretku radnih sati,
- uključivanje svake grupe hlađenja barem jednom u nekom definiranom periodu (tjedan dana) na kratko vrijeme radi propuhivanja,
- uključivanje svake grupe hlađenja kod niskih temperatura (ispod definirane, 0°C) barem jednom u nekom definiranom periodu (jedan sat) na kratko vrijeme radi sprečavanja zaleđivanja.

4. ISPITIVANJA NA MODELU TRANSFORMATORA I SUSTAVA ZA UPRAVLJANJE RASHLADOM

4.1 Ispitni model i tijek ispitivanja

Ispitni model transformatora i sustava za upravljanje hlađenjem sastoji se od modela transformatora (posuda s transformatorskim uljem grijana grijačem), ventilatora koji simuliraju rad pojedinih hladnjaka, temperaturnih sonde za mjerenje temperature okoline i ulja gore te Compact FieldPoint kontrolera na kojeg su vezani svi ulazno/izlazni signali modela transformatora i računalo s instaliranim sustavom motrenja transformatora Končar TMS. Priključkom grijača na mrežu preko regulacijskog transformatora je omogućeno mijenjanje snage zagrijavanja, čime se simulira promjena opterećenja transformatora. Paralelan rad termoslike i sustava inteligentnog upravljanja rashladom je izvedeno pomoću dva paralelno spojena upravljačka kruga za upravljanje svakim hladnjakom, a signale za uklop/isklop dobivaju iz kontrolera. Ispitni model je prikazan na slici 1.

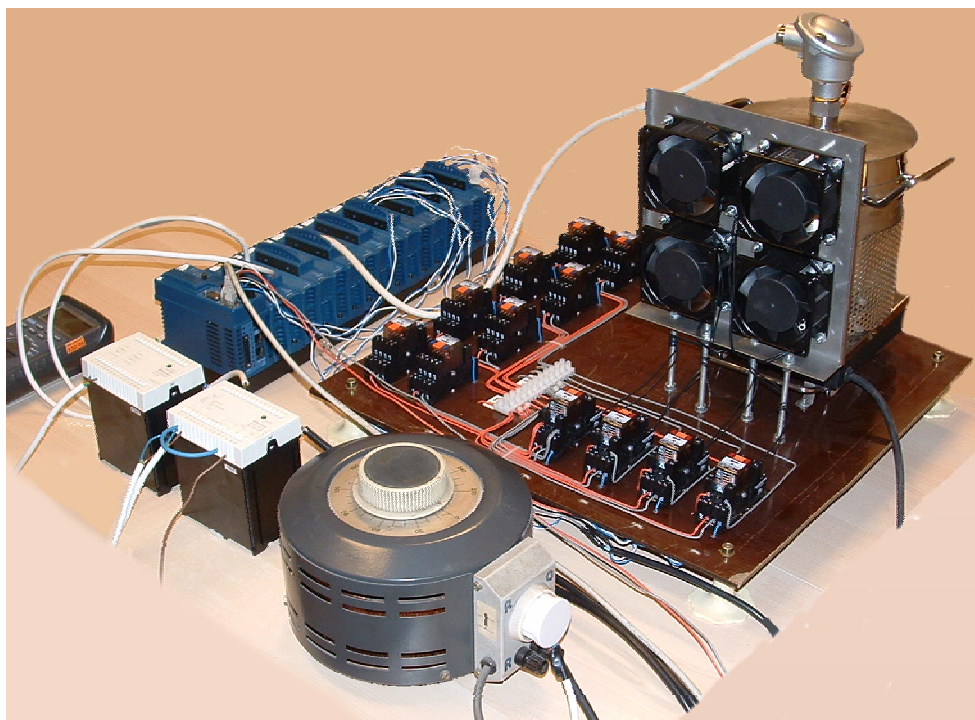
Za simuliranje rada termoslike je razvijen i korišten poseban algoritam. Koriste se četiri ventilatora raspoređena u tri grupe hlađenja, za koje su vremenske konstante zagrijavanja ulja dane u Tablici I. Iznosi vremenskih konstanti zagrijavanja ulja su računati prema [4].

Bitno je naglasiti kako je omjer iznosa rashladne snage i snage grijanja na ispitnom modelu znatno manji u odnosu na iznos tog omjera na stvarnom transformatoru, te bi se učinci sustava upravljanja hlađenjem bolje uočavali na stvarnom transformatoru. Također, kako na ispitnom modelu ne postoji namot, računati iznosi temperature najtoplije točke namota su fiktivni i računati iz ulaznih podataka prema [1], [2] i [3].

Tablica I. Vremenske konstante zagrijavanja ulja za različite grupe hlađenja

Grupa hlađenja	Broj uključenih hladnjaka	Vremenska konstanta zagrijavanja ulja (minute)
1	1	42
2	2	37
3	4	32

Temperaturne granice termoslike za uključivanje druge i treće grupe hlađenja su 45°C i 75°C. Granice za isključivanje druge i treće grupe hlađenja su 40 °C i 70 °C, odnosno za 5 °C niže od temperatura uključivanja. Prva grupa hlađenja se uključuje s priključivanjem modela na mrežu.



Slika 1. Ispitni model za ispitivanje sustava upravljanja rashladom

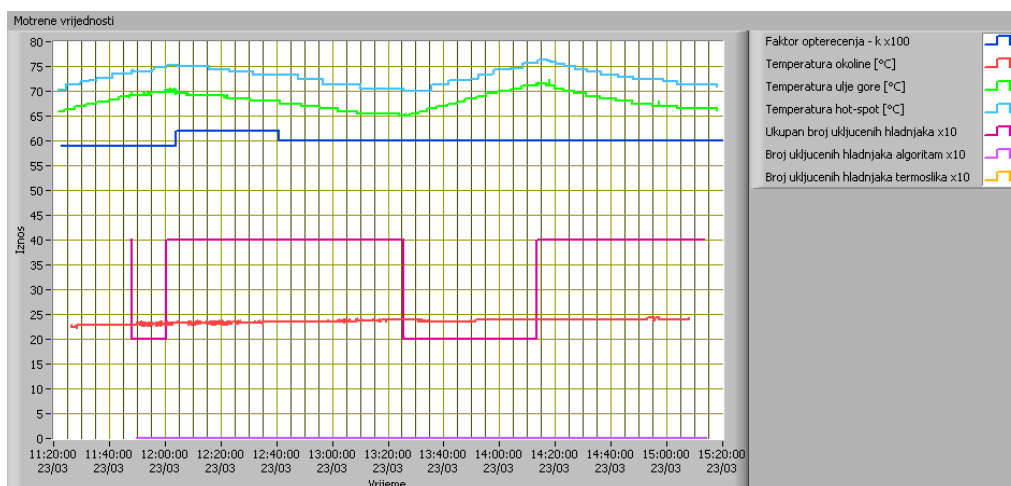
Na ispitnom modelu je simuliran rad termoslike pri konstantnom opterećenju modela transformatora, a potom i paralelan rad sustava inteligentnog upravljanja rashladnim sustavom i simulacije termoslike. Praćeni su iznosi temperaturnih oscilacija kod rada ovih dvaju različitih sustava upravljanja rashladom.

Potom je na ispitnom modelu napravljen pokus step opterećenja kod stanja potpuno neopterećenog transformatora ($k=0$) s temperaturom ulja izjednačenom s temperaturom okoline. Na ispitni model je narinuto opterećenje od $k=1,3$, znači 30% iznad nominalnog. Pokus je prvo izveden samo sa simulacijom termoslike, a potom s paralelnim radom sustava inteligentnog upravljanja rashladom i simulacije termoslike. Mjereno je vrijeme od trenutka kada je narinuto opterećenje na model transformatora do trenutka kada se uključi treća grupa hlađenja, što znači uključenu punu rashladnu snagu. Razlika u vremenima uključivanja treće grupe hlađenja nam daje razliku u brzini reagiranja ovih dvaju sustava.

4.2. Rezultati ispitivanja

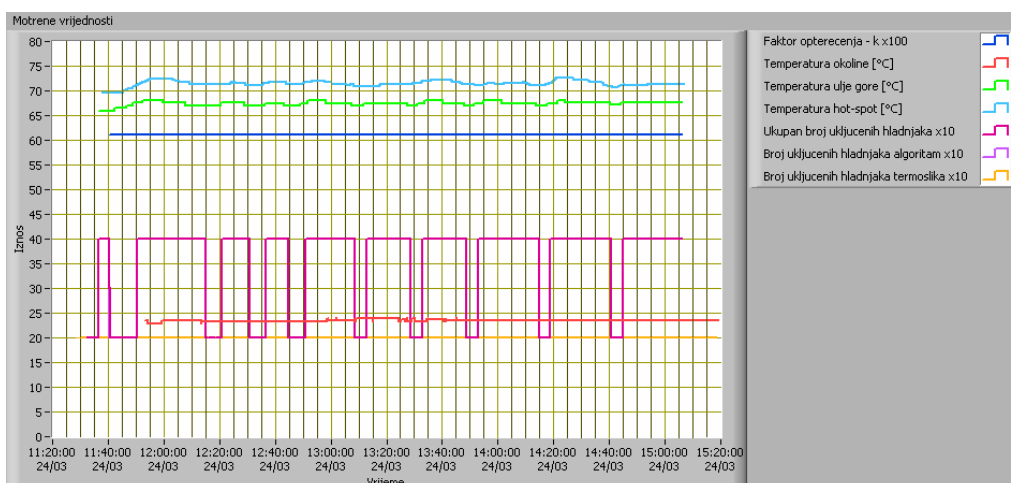
Na slikama 2. do 5. prikazani su dijelovi rezultata ispitivanja za slučajeve navedene u 4.1. Određene varijacije u iznosu faktora opterećenja na slikama 2. do 5. nakon postavljanja njegove konstantne vrijednosti su uzrokovane fluktuacijom mrežnog napona.

Na slici 2. je prikazana ovisnost iznosa temperature ulja gore i temperature najtoplije točke namota o radu rashladnog sustava kojim u ovom slučaju upravlja simulacija termoslike pri konstantnom opterećenju iznosa približno 0,6 i pri približno konstantnoj temperaturi okoline od 24 °C. Uočljivo je kako temperatura ulja varira od iznosa 65 °C do 72 °C, što je varijacija od 7 °C. Varijacija iznosa temperature ulja gore u ovom opsegu je zbog toga što se za uključenje/isključenje treće grupe hlađenja promatra odgovarajuća trenutna temperatura najtoplije točke namota. To se uočava na slici 2. promatranjem kretanja iznosa temperature najtoplije točke namota i iznosa pri kojima se uključuje i isključuje treća grupa hlađenja.



Slika 2. Temperature ulja gore i najtoplije točke namota kod konstantnog opterećenja $k=0,6$ i upravljanja rashladom simulacijom termoslike

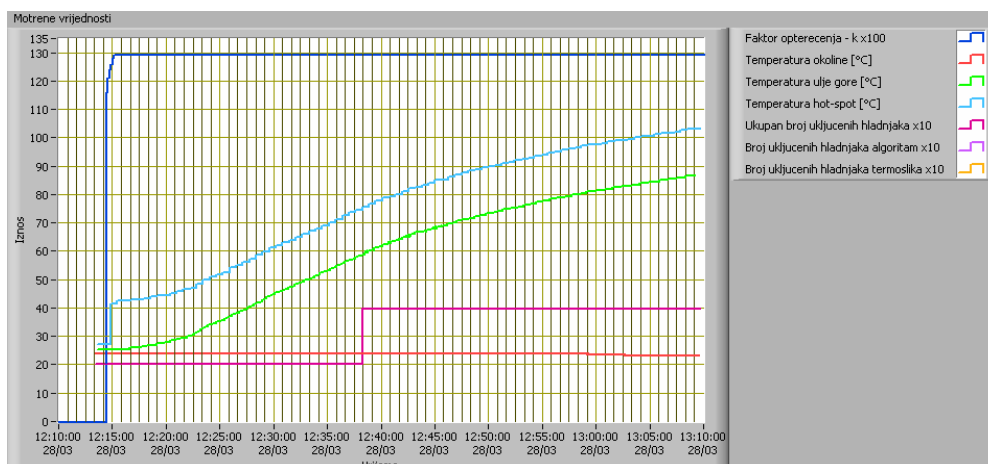
Na slici 3. je prikazana ovisnost iznosa temperature ulja gore o radu rashladnog sustava kod paralelnog rada sustava inteligentnog upravljanja rashladom i termoslike pri konstantnom opterećenju iznosa približno 0,6 i pri približno konstantnoj temperaturi okoline od 24 °C. Uočljivo je kako temperatura varira od iznosa 66 °C do 68 °C, što je varijacija od 2 °C. Ako se uspoređi ovaj iznos varijacije u temperaturi ulja gore u odnosu na varijaciju iznosa te temperature od 7 °C kod upravljanja simulacijom termoslike, vidi se da je taj iznos bitno niži. To znači manji unos vlage i kisika u transformator kod transformatora s otvorenim sustavom disanja, čime se usporava starenje izolacije transformatora.



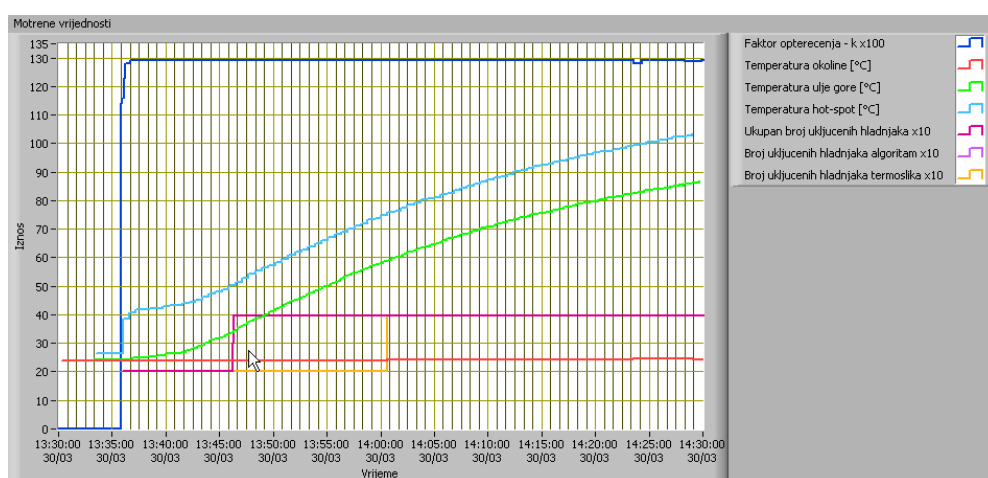
Slika 3. Temperatura ulja gore i temperature najtoplije točke namota kod konstantnog opterećenja $k=0,6$ i paralelnog rada sustava inteligentnog upravljanja rashladom i simulacije termoslike

Na slici 4. su prikazane temperatura najtoplije točke namota i temperatura ulja gore kod testa step opterećenja opisanog u točki 4.1 za slučaj kada rashladom upravlja samo simulacija termoslike. U početku pokusa su uključene prve dvije grupe hlađenja. Mjeri se vrijeme potrebno da se uključi treća grupa hlađenja, odnosno sva četiri ventilatora. U ovom slučaju to vrijeme iznosi 23 minute.

Na slici 5. su prikazane temperatura najtoplije točke namota i temperatura ulja gore kod pokusa step opterećenja opisanog u točki 4.1 za slučaj paralelnog rada sustava inteligentnog upravljanja rashladom i simulacije termoslike. U ovom slučaju vrijeme potrebno da se uključi treća grupa hlađenja iznosi 10 minuta. To uključivanje je zadano od strane sustava inteligentnog upravljanja rashladom, dok simulacija termoslike nalog za uključivanje 25 minuta nakon početka terećenja. U ovom slučaju simulacija termoslike nešto kasnije uključuje treću grupu hlađenja nego u slučaju samostalnog rada zbog toga što je sada hlađenje modela transformatora bolje zbog ranije uključene treće grupe hlađenja od strane sustava inteligentnog upravljanja rashladom. Uslijed toga je temperatura najtoplije točke namota kasnije dostigla granicu za uključivanje treće grupe hlađenja.



Slika 4. Vrijeme uključanja treće grupe hlađenja kod pokusa step opterećenja modela transformatora i upravljanja rashladom simulacijom termoslike



Slika 5. Vremena uključanja treće grupe hlađenja kod pokusa step opterećenja modela transformatora i paralelnog rada sustava inteligentnog upravljanja rashladom i simulacije termoslike

5. ZAKLJUČAK

Inteligentno upravljanje rashladnim sustavom transformatora sustavom motrenja transformatora Končar TMS pokazuje vidljive prednosti u svom radu pred klasičnim sustavima upravljanja hlađenjem. Sustav reagira na promjene opterećenja, te prilagodbom potrebne rashladne snage reagira brže nego klasični sustavi upravljanja rashladom transformatora koji djeluju nakon porasta temperature ulja, što unosi kašnjenje u reakciji zbog vremenskih konstanti zagrijavanja ulja. Oscilacije u temperaturi ulja transformatora su također smanjene prilagodbom rashladne snage opterećenju transformatora i temperaturnim uvjetima u okolini. Manje oscilacije u temperaturi ulja kod transformatora s otvorenim sustavom disanja znače manji unos vlage i kisika u transformator čime se usporava starenje izolacijskog sustava transformatora.

6. LITERATURA

- [1] IEC 60345 (1991): Loading Guide for Oil-immersed Power Transformers, 1991
- [2] ANSI/IEEE C57.92-1981: Guide for Loading mineral-oil-immersed power transformers up to and including 100 MVA with 55°C and 65°C winding rise, 1981
- [3] IEEE C57.115-1991: Guide for loading mineral-oil-immersed power transformers rated in excess of 100 MVA (65°C winding rise), 1991
- [4] Zdenko Godec, Steady-State Temperature Rise Determination, Automatika 33, 3-6, 1992