

UPRAVLJANJE HLAĐENJEM VISOKONAPONSKOG TRANSFORMATORA SHENBIAN 400 /110 /10 kV/ kV/ kV, 300 MVA

Dragan Brajović¹, Goran Uzelac¹

REZIME

Savremeni elektroenergetski sistemi počivaju na naizmjeničnoj struji a rad takvih sistema nezamisliv je bez transformatora. Visokonaponski energetske transformatori čine centralne elemente trafostanica prenosnog sistema. Transformator je složen sistem sa podsistemima upravljanja, regulacije, nadzora, zaštite i hlađenja. Cena visokonaponskih elektroenergetskih transformatora je do 4 miliona evra, mogućnost nabavke ograničena dužim rokom isporuke a sam transport i zamena fizički zahtevna.

Usled velike važnosti transformatora, velike cene zamene svako unapređenje u eksploataciji i održavanju kao rezultat ima povećanje pouzdanosti rada sistema i smanjenje troškova. U radu se prikazuju mogućnosti daljeg poboljšanja sistema i načina hlađenja u cilju produženja životnog veka transformatora

Ključne reči: Transformator, opterećenje transformatora, starenje transformatora, papirna izolacija, izolacioni sistem

COOLING CONTROL OF HIGH-VOLTAGE TRANSFORMER SHENBIAN 400 /110 /10 kV/ kV/ kV, 300 MVA

ABSTRACT

Modern power systems rely on alternating current, and the operation of such systems is unthinkable without transformers. High-voltage power transformers are central elements of transmission system substations. A transformer is a complex system with control, regulation, monitoring, protection and cooling subsystems. The price of high-voltage power transformers is up to 4 million euros, the possibility of procurement is limited by the longer delivery period, and the transport and replacement itself is physically demanding.

Due to the great importance of the transformer, the high cost of replacement, any improvement in operation and maintenance results in an increase in system reliability and cost reduction. The paper presents the possibilities of further improvement of the system and cooling method in order to extend the lifetime of the transformer

Key words: Transformer, transformer load, transformer aging, paper insulation, insulation system.

1. UVOD

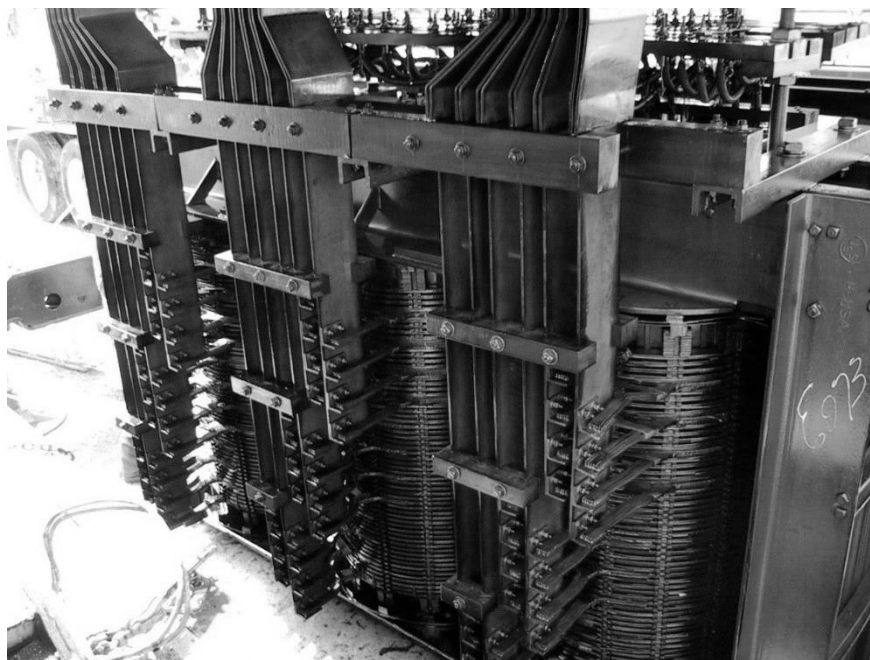
Cilj rada je prikazati mehanizme starenje izolacije transformatora pod uticajem temperature i mogućnosti produženja životnog veka visokonaponskih energetskih transformatora usled poboljšanja hlađenja. Savremena potrošnja zahteva veća opterećenja energetskih transformatora a prekidi napajanja potrošača imaju visoke troškove tako da je pravilno odražavanje uz pravilnu eksploataciju imperativ.

U analizi i eksploataciji energetski transformator više nije samo električna mašina već se pod transformatorom može smatrati samostalan tehnološki sistem i tehnološki proces koji je potrebno optimizirati i nadzirati. Usled velike vrednosti transformatoru se prilazi i ekonomski te vrše optimizacije po principu ulaganja i ostvarenja dobiti.

Povećanje temperature naročito štetno utiče na papirni izolacioni sistem. Pored štetnog uticaja temperature na izolacione materijale utiče naponsko i mehaničko naprezanje. Izolacioni materijali (dielektrici) upotrebljavaju se za izolaciju delova energetskih transformatora koji su na visokim naponima. Da bi izolacija izdržavala rad na određenoj temperaturi definiše se temperaturna klasa izolacije (Y, A, E, B, F, H, C) odnosno dozvoljena radna temperatura najtoplijeg mesta. Vek trajanja izolacije (tj. energetskog transformatora) je obrnuto ekponencijalna funkcija proizvoda temperature i vremena rada na određenoj temperaturi.

¹Fakultet tehničkih nauka Čačak, Svetog Save 65

Magnetno kolo i namotaji (slika 1.) su metalnog porekla tako da je uticaj temperature na njihov vek njihov vek trajanja beznačajan pa se pod pojmom starenja energetskog transformatora prvenstveno podrazumeva promena karakteristika izolacionih sistema pod uticajem temperature.



Slika 1. Jezgro i namotaji energetskog transformatora [1]

2.1. UTICAJ TEMPERATURE NA TRANSFORMATOR

2.1. Povećanje otpornosti namotaja pri povećanju temperature transformatora

Bakar je provodnik sa pozitivnim temperaturnim koeficijentom, odnosno povećanjem temperature povećava se i otpor bakarnog provodnika. Otpor namotaj energetskih transformatora određuje se na temperaturi od 75°C ili 115 °C (zavisno od temperature klase izolacije) sa jednosmernom strujom. Povećanjem temperature povećava se otpor bakra a potom i snaga gubitaka.

$$P_{cu} = I^2 R_{cu} \quad (1)$$

$$R_{cu} = R_0 (1 + \alpha_0 T) \quad (2)$$

R_0 .otpor na temperaturi 0°C a

α_0 temperaturni koeficijent otpornosti a

T je temperatura.

Promena otpora namotaja energetskog transformatora pri promeni temperature (T) prikazuje se formulom:

$$R_{cu} = R_0 (1 + \alpha_0 T) \quad (3)$$

$$R_1/R_2 = (R_0 (1 + \alpha_0 T_1)) / (R_0 (1 + \alpha_0 T_2)) \quad (4)$$

Za bakar $\alpha_0 = 1/235$ tako da je

$$dR_{cu} = R_0 (1 + \alpha_0 dT) \quad (5)$$

$$dR_{cu} = R_0 (1 + 1/235 dT) \quad (6)$$

pa je povećanje gubitaka usled povećanja temperature za 1°C stepen

$$\Delta P = I^2 ((R_0 (1 + \alpha_0 T_1)) - (R_0 (1 + \alpha_0 T_2))) \quad (7)$$

$$\Delta P = I^2 R_0 \alpha_0 (T_1 - T_2) \quad (8)$$

$$\Delta P = I^2 R_0 \alpha_0 \quad (9)$$

U procentualnom iznosu to je oko 0,4 % što na primeru maksimalno opterećenog transformatora od 300 MVA i gubicima od 2% iznosi 6 MVA tj 6000 kVA pa 0,4% iznosi 24 kW.

2.2. Uticaj temperature na papirnu izolaciju

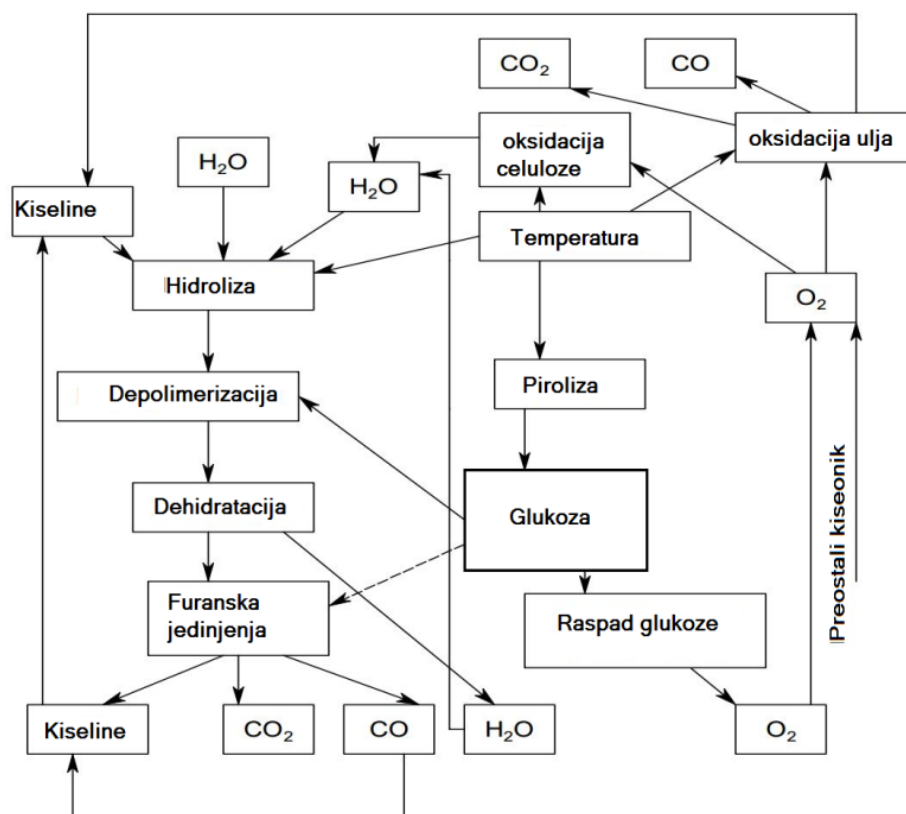
Za energetske transformatore upotrebljava se izolacioni papir dobijen iz sporo rastućih četinara. Kvalitetan izolacioni papir čine vlakna koja imaju najduže molekule ($N=1000-2000$) [2].

Dužina molekula određuje se hemijskim putem i izražava se brojem DP (degree of polymerization) odnosno broj karika koje imaju OH nastavak preko koga se vežu i nastaju molekularni lanci. U proizvodnji izolacionog papira drvo se kuva u bazama sa ciljem da se uklone smole, zatim sledi neutralizacija i ispiranje pa postupak mlevenja u specijalnim mlinovima potom razređivanje u vodi i prolazak kroz sita da bi se molekuli orijentisani u zadanom pravcu. Ukoliko se OH nastavci ne vežu u molekule i ostanu slobodni i neorijentisani, u električnom polju zbog polarizacije izazivaju dielektrične gubitke a pored toga vežu molekule vode. Usled električnog polja i uz prisustvo vode kreću degradirajući hemijski procesi koji skraćuju molekule celuloze odnosno DP a raste $\text{tg}\delta$. Proces je ireverzibilan i progresivan. Sušenjem i promenom ulja uklanja se voda i popravlja $\text{tg}\delta$ ali narušene mehaničke i hemijske karakteristike papirne izolacije ne mogu se promeniti odnosno povratiti. Mehanički uticaji na papirnu izolaciju nastaju usled stalnih vibracija, magnetostrikcije ili jakih mehaničkih udara koji se javljaju prilikom kratkih spojeva na elektroenergetskoj mreži

Degradacija izolacionog papira pogoduje pojavi čestica celuloze koje vežu vodu i dalje utiču na pojavu parcijalnih parnjenja koja utiču na progresiju degradacije. Mehanizmi degradacije čvrste izolacije su hidroliza (pod uticajem vode), piroliza (pod uticajem temperature) i oksidacija (pod uticajem kiseonika). Pod uticajem temperature celuloza postaje krta i lako se oštećuje. Kvalitetan izolacioni papir ima DP iznad 1200.

Na celulozu papirne izolacije deluju tri hemijska mehanizma (slika 2.):

1. *Hidroliza* - nastaje pod uticajem vode i kao produkt nastaje kiseonik
2. *Oksidacija* - pod uticajem kiseonika nastaje CO, CO₂, voda i kiseline. Nastala voda ubrzava proces hidrolize. Bakar i voda se u procesu oksidacije ponašaju kao katalizatori.
3. *Piroliza* - predstavlja termičku razgradnju celuloze pri čemu nastaju gasovi CO, CO₂ i voda.

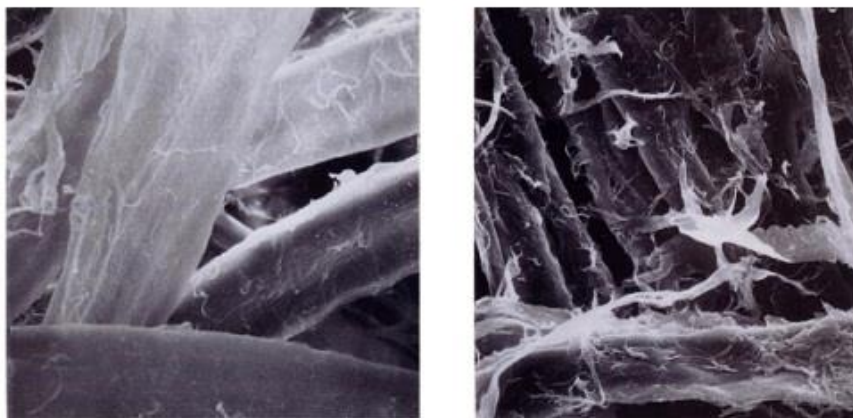


Slika 2. Proces hemijske degradacije celuloze [3]

3. POSLEDICE UTICAJA TEMPERATURE

Stanje papirne izolacije preslikava stanje transformatora odnosno realnu starost transformatora (i preostali životni vek). Remont u smislu zamene papirne izolacije je moguć ali izuzetno skup zahvat. Takve popravke rade se u fabrici i transformator duže vreme nije u funkciji. Najčešće se ovakve popravke ne rade jer prevazilaze vrednost upotrebljavanog transformatora, tako da potpuna degradacija papira znači i kraj životnog veka transformatora. Na izolacioni papir deluju hemijski, termički, mehanički i električni uticaji (slika 3). Naročito nepovoljno utiču parcijalna pražnjenja na mestima gde je jačina električnog polja veća od dielektrične čvrstoće.

Izolacioni papir je upotrebljiv do vrednosti DP (degree of polymerization) od 200 do 250 koje odgovaraju mehaničkoj čvrstoći od oko 50% od početne vrednosti.



Slika 3. Struktura izolacionog papira (novi i stari) [3]

Ako temperatura pređe 120°C molekulske veze u celulozi se raspadaju a kao proizvod nastaje glukoza, oksidi, ugljenik i voda. Stanje papirne izolacije odnosno provera stepena polimerizacije najtačnije se ustanovljava uzimanjem uzorka sa različitih mesta energetski transformatora odnosno na različitim nivoima transformatora. Raspadom celuloze u ulju se pojavljuju čestice koje izazivaju nova parcijalna pražnjenja. Čestice i sami parcijalni proboji kontaminiraju ulja i ruše mu dielektrična svojstva. Takvo degradirano ulje se mora ili regenerisati ili zameniti. Ulje transformatora se svake godine ispituje gasnohromatografskom analizom i po dobijenim rezultatima odnosno po vrsti i količini gasova koji su apsorbovani u ulju određuje stanje i kvalitet ulja.

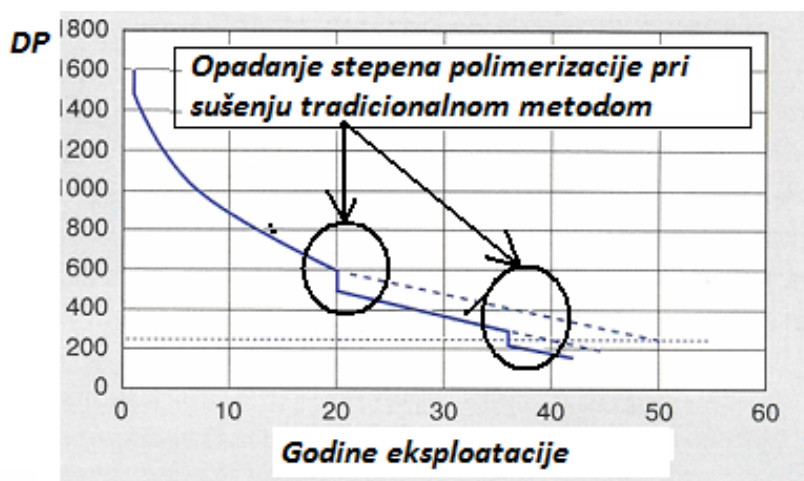
U tabeli br.1 date su preporuke za postupanje sa transformatorima pri snižavanju DP.

Tabela 1. DP vrednosti-preporuke prema autorima Nejedly i Newsely

DP	Stanje celuloze	Preporuka
>1000	Neznatno starenje	
1000-600	Malo starenje	
600-400	Umereno starenje	
400-250	Jako starenje	isključiti energetski transformator
250-150	Izuzetno starenje	isključiti energetski transformator
<150	Ekstremno starenje	

Transformatori se transportuju bezulja. Konzervacija se vrši stavljanjem transformatora u na dpritisk azotom (N). Prilikom zamena ulja odnosno ulivanja ulja u transformatore, transformator se zagreva i vakumira da bi isparila voda koja se nalazi u izolacionom papiru. Zagrevanje prilikom sušenja degradira papirnu izolaciju i ruši stepen polimerizacije za 50 do 250 jedinica. Ukoliko se posmatra slika 4 može se zaključiti da primena ovakvih metoda za

energetske transformatore starije od 20 godina nije preporučljiva jer drastično obara vrednost stepena polimerizacije i skraćuje vek energetskog transformatora.



Slika 4.. Stepen polimerizacije u funkciji godina eksploatacije i sušenja [4]

Matematičku izraz starenja energetskog transformatora dao je Arrhenius formulom:

$$T_v = A e^{(B+CT)} \quad (10)$$

Pri čemu je T_v vek trajanja izolacije, A , B , C konstante izolacionog materijala a T temperature. Postoji formula Montsingera za temperaturu od 80 °C do 140 °C gde su A i b odgovarajuće konstante, a T_v temperatura u °C:

$$T_v = A e^{-bT} \quad (11)$$

Kraj životnog veka transformatora predstavlja razaranje papirne izolacije bilo dugotrajnijim procesom starenja ili razaranjem nastankom kvara. Slika 5. prikazuje razoren namotaj i degradiranu papirnu izolaciju, vidljiva je karbonizacija papira uz znatno osipanje i krivljenje namotaja usled pojave jakih sila. Kod transformatora sa niskim DP svaka pojava jakih struja uz prateće sile izaziva vibracije i pojavu čestica papira u ulju.



Slika 5. Razoren namotaj i papirna izolacija namotaja transformatora

Kumulativno starenje prikazuje ukupno starenje papirne izolacije u toku određenog perioda.

1.3. Termičke mogućnosti opterećenja energetskih transformatora i starenje transformatora

Nominalna snaga energetskog transformatora izražava se u MVA. Pod nominalnom snagom naziva se snaga neprekidnog pogona pri kojoj temperatura najtoplije tačke ne prelazi 98 °C uz temperature sredine od 20°C a da se pri tome ostvari normalan vek trajanja. Snaga opterećenja je ona snaga pri kojoj temperatura najtoplije tačke iznosi maksimalno 140°C a temperatura izolacionog ulja ne prelazi 115 °C. Iz gornjih definicija jasno je da maksimalna snaga kojom možemo opteretiti transformator ograničena temperaturom samog transformatora a indirektno temperaturom okoline i hlađenjem. Energetski transformator se hladi prisilnom konvekcijom, te kondukcijom kroz kroz kazan (zavisno od površine energetski transformatora i spoljne temperature) te radijacijom (koja zavisi od temperature, boje i površine). Takođe se dodatno zagreva usled radijacije sunca.

Energetski transformator nije homogeno telo a izvori energije gubitaka nisu jednako raspoređeni unutar energetskog transformatora. Strujanje ulja nije jednako u svim tačkama energetski transformatora pa ni temperatura nije jednaka u svim tačkama energetskog transformatora. Iako realan energetski transformator nije homogeno telo za potrebe proračuna može se aproksimirati i postaviti pretpostavka homogenosti i pri tome se postavlja diferencijalna jednačina promene temperature energetskog transformatora.

U kratkom vremenu (dt) uz snagu gubitaka P prirast energije će iznositi:

$$E = Pdt$$

(10) Toplotna energija delom prelazi u okolinu E_{pr} (kroz kućište i/ili kroz prinudno hlađenje) a delom će se akumulirati u jezgri i izolacionom ulju E_{ak} što se manifestuje povećanjem temperature.

$$E = E_{pr} + E_{ak} \quad (11)$$

Pri čemu je :

$$E = Pdt \quad (12)$$

$$E_{pr} = \alpha ST \quad (13)$$

α . koeficijent toplotne provodnosti kućišta, S površina kućišta, T temperatura

$$E_{ak} = mc(T_1 - T_2) \quad (14)$$

m - masa, c - specifični toplotni kapacitet.

Prelaskom u diferencijalni oblik dobijamo:

$$Pdt = \alpha STdt + mc dT \quad .. \quad (15)$$

Uz početni uslov $T=0$ i stacionarno stanje u kome nema promene temperature odnosno $dT=0$ (T je stacionarna temperatura) pri čemu je promena akumulisane energije takođe nula

$$Pdt = \alpha STdt \Rightarrow T = P/(\alpha S) \quad (16)$$

Vremenska konstanta zagrevanja t_1 iznosi

$$t_1 = mc/(\alpha S) \quad (17)$$

Rešenje diferencijalne jednačine po T je :

$$T = T_{st}(1 - e^{-(t/T_1)}) + T_0 e^{-(t/T_1)} = (T_{st} - T_0)(1 - e^{-(t/T_1)}) + T_0 \quad (18)$$

Postizanje stacionarne temperature prikazano je na slici 13. Energija gubitaka povećava temperaturu energetskog transformatora odnosno temperatura raste.

Prilikom hlađenja ($P=0$) pa je rešenje diferencijalne jednačine po T :

$$T = T_0 e^{-(t/T_1)} \quad (19)$$

4. POBOLJŠANJE UPRAVLJANJA HLAĐENJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Modeliranje ekspertnih sistema na bazi iskustva korisnika takođe je resurs koji se može koristiti u rešavanju ovakvih problema. Velik broj različitih izvedbi transformatora nameće pristup svakom transformatoru ponaosob. U ovom radu predložena su poboljšanja koja je moguće izvesti na energetskom transformatoru koji se nalazi u pogonu na transformatorskoj stanici TS 400/110/10 kV/kV/kV Sombor 3 a to je energetski transformator proizvođača Shenbian 400/110/10 kV/kV/kV fabričke oznake OSFPSZ-30000/400 TH nazivne snage 300/300/80 MVA/MVA/MVA, način hlađenja ODAF, sprega Yy0d5, autotransformator. Energetski transformator ima regulacionu sklopku proizvođača Reinhausen sa mogućnošću regulacije pod opterećenjem. Energetski transformator je u pogonu od januara 2007 godine. Transformator na TS Sombor 3 opremljen je sa četiri hladne grupe sa po 3 elektromotora i sa četiri pumpe (jedna po hladnoj grupi) što čini ukupno 16 asinhronih motora snage po 3 kW.

Upravljanje hlađenjem transformatora treba da postigne sledeće uslove i poboljšanja hlađenja:

1. Postigne smanjenje troškova hlađenja transformatora
2. Produži životni vek transformatora

3. Smanji gubitke transformatora
4. Olakša održavanje hlađenja
5. Omogući nadzor hlađenja transformatora.
6. Smanji broj kvarova i ispada transformatora.



Slika 6. Transformator Shenbian 400 /110/10 kV/kV/ kV, 300MVA

4.2. Predlog poboljšanja hlađenja transformatora Shenbian 400 /110/10 kV/kV/ kV 300MVA

Sadašnji koncept hladnih grupa je relativno prost i svodi se na merenje temperature ulja (kontaktnim termometrom ili Pt sondom) i/ili merenje temperature najtoplije tačke termoslikoma rashladni ventilatori se uključuju i isključuju po grupama koje su određene temperaturom. Svaka grupa ventilatora hladi jedan radiator (sa više ventilatora) koji ima sopstvenu pumpu.

Mane ovakvog sistema su:

1. Neravnomerno trošenje hladnih grupa.
2. Neravnomerno strujanje ulja unutar energetski transformatora
3. Neoptimalno hlađenje

U radu su predložena poboljšanja:

1. Upotreba PLCa u izvođenju upravljanja rada hladnih grupa
2. Upotreba frekventih regulatora
3. Integracija upravljanja hladnim grupama sa sistemom za nadzor transformatora
4. Povezivanje sa SCADA sistemom
5. Reorganizacija hladnih grupa
6. Istovremeni rad svih pumpi.
7. Prethlađenje
8. Praćenje najtopliji tačaka svake faze pojedinačno.
9. Izračunavanje kumulativnog starenje svake faze.
10. Reverziranje motora ventilatora
11. Sprečavanje naglog hlađenja transformatora
12. Rad hlađenja sa pumpama i po gašenju transformatora

PLC omogućava obuhvatanje više promenljivih, bolju i jednostavniju organizaciju upravljanja.

Postavljanje frekventne regulacije na motorima hlađenja daje prednosti kao što su smanjenje potrošnje električne energije, smanjeno habanje električnih motora, mogućnost reverziranja i finije podešenje rada hladnih grupa u funkciji temperature. Do sada je uključivanje hladnih grupa bilo kasadno uključeno po 3 motora što je činilo dosta grubo podešenje hlađenja za određenu temperaturu. Postavljanje regulatora na motore pumpi i u konceptu stalnog rada uljnih pumpi moguće je menjati protok ulja kroz pojedine hladne grupe i tako postići promenu tokova u ulju

odnosno smanjenje broja mesta kroz koje tok ulja minimalan odnosno smanjiti mesta lokalnog pregrevanja koja se javljaju usled laminarnih tokova ulja.

Nadzor energetskog transformatora u novije vreme može biti deo transformatora kojeg takođe isporučuje proizvođač transformatora a kod starijih transformatora nadzor transformatora se nadograđuje na postojeći transformator. Cilj nadzora je praćenje referentnih parametara transformatora.

Stariji energetski transformatori su nastali pre SCADA sistema ali postavljanje SCADA sistema je moguće na svakom tehnološkom sistemu tako i na transformatorima. SCADA sistemi uvedeni su u svim TSD EMS. Dometi takvih SCADA u nadzoru transformatora su ograničeni jer su obuhvaćeni samo signali koji su već postojali na transformatorima ili transformatorskim poljima. Takvi sistemi su prvenstveno namenjeni eksploataciji elektroenergetskih objekata dok je nadzor transformatora u smislu produženja veka ili održavanja nepostoji. Sistemi nadzora mogu da eksportuju dobijene informacije u SCADA sistem elektroenergetskog objekta.

Na slici br. 6 je transformator 400/110/10 kV/kV/kV na TS Sombor 3 sa četiri hladne grupe. Ukoliko se prepusti radu fabrički postavljene automatike, da na određenoj temperaturi uključuje jednu definisanu grupu može doći do situacije da je jedna strana transformatora stalno hladena tokom ulja a druga sa minimalnim ili gotovo nikakvim tokom. Usled toga dolazi se do zaključka da najtoplija tačka uvek na jednom mestu i to na mestu gde tok ulja zavisi od hladne grupe koja se zadnja uključuje. Do sada se smatralo da temperature najtoplije tačke zavisi od opterećenja i temperature ulja dok se protok ulja oko najtoplije tačke nije uzimao u obzir.

Predlaže se reorganizacija hladnih grupa sa vertikalno postavljene hladne grupe na tri horizontalno pri čemu bi sve pumpe istovremeno bile u pogonu.

U ovakvom konceptu dobijamo sledeće prednosti:

1. Ujednačenost hlađenja energetskog transformatora
2. Ujednačenost trošenja pumpi
3. Bolje hlađenje (ulje prolazi kroz celokupnu površinu postojećih radiatora)
4. Najopterećeniji je donji niz ventilatora tako da je moguća svaka popravka bez isključenja energetski transformatora.
5. Produženje životnog veka energetski transformatora.

Kod OFAF sistema hlađenja energetskih energetski transformatora tokovi ulja unutar i kroz namotaje nisu dirigovani tako da se formiraju slobodno. Putanja toka ulja zavisi od unutrašnje konstrukcije energetskog transformatora i pumpi koje su u pogonu. Kod postojećeg koncepta ulje se zahvata u gornjim nivoima i pumpama gura kroz radijatore ka donjem nivou.

U ovom konceptu transformatoru se prilazi kao dvodimenzionalnom sistemu pa je grubo je zanemarena činjenica da transformator ima i treću dimenziju tj. dužinu. Koncept pokretanja hladnih grupa koju su podužno raspoređene na transformatoru daje efekat boljeg hlađenja namotaja koji se nalaze naspram hladne grupe.

U toj situaciji kad je najtoplija tačka samo kvantitativno određena sigurno se nalazi na namotajima faze koja se najslabije hladi. Takav rad za posledicu ima preterano starenje najslabije hlađene faze odnosno starenje koje nije u skladu sa kumulativnim starenjem koje nam prikazuje vrednost najtoplije tačke. Ukoliko se takav rad hladnih grupa pojavi a najslabije hlađena faza bude i najopterećenija fatalan kvar termički i električno najopterećenije faze nastaje znatno ranije od drugih faza

Da bi se takva pojava predupredila predlaže se reorganizacija hladnih grupa iz vertikalnog u horizontalne i stalan rad svih pumpi. U takvom konceptu pozicija namotaja faza više nedolazi do izražaja i starenje namotaja faza zavisi samo od opterećenja i temperature ulja. Usled mešanja ulja temperatura ulja se može smatrati jednakom tako da starenje faza zavisi samo od opterećenja na ne od poziciji namotaja u odnosu na tokove ulja.

Stalan rad svih pumpi posle određenog vremena ima za posledicu stabilne tokove lokalno laminarne ili turbulente verovatno sa mestima koja u takvoj situaciji imaju oslabljeno hlađenje usled smanjenog lokalnog toka. Ovakav problem uz frekventno upravljanje pumpama može se otkloniti radom svih pumpi sa naizmeničnim menjanjem broja obrtaja pojedinih pumpi. Takav rad daje ima za posledicu turbulentanije tokove unutar transformatora i povećanje protoka i na mestima termičkih džepova koji se javljaju u skrivenim mestima.

U trenutku gašenja transformatora temperatura namotaja je viša od temperature ulja tako da temperatura ulja po gašenju raste jer dolazi do izjednačenja temperature ulja i namotaja. Ukoliko se posmatra lokalno temperatura najtoplije tačke raste usled prestanka strujanja ulja i opada kondukcijom što ima određeno trajanje. Usled kumulativnog dejstva temperature na starenja može se doći do zaključka da starenje nastaje i određeni period po gašenju transformatora. Ovaj problem dolazi do izražaja naročito ako transformator radi u visokom opterećenju pa mu je i temperatura u gornjim granicama.

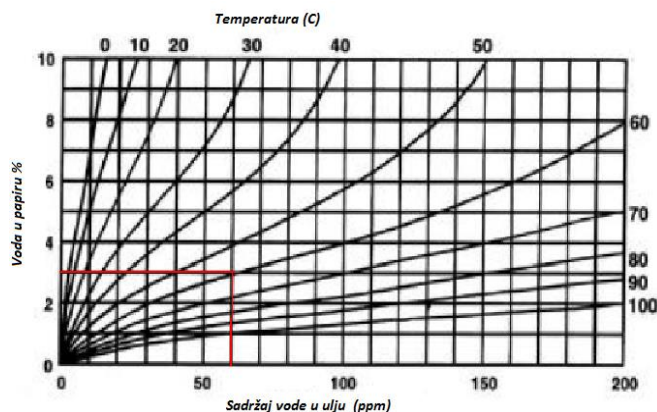
Temperatura ulja zavisi od opterećenja, spoljne temperature, broja uključenih hladnih grupa i polazne temperature. Spoljna temperatura ima sezonski karakter i dnevni predvidljiv ciklus. Opterećenje ima takođe dnevni ciklus sa vrlo

predvidljivim maksimumima. Na spoljnu temperaturu i opterećenje ne možemo uticati ali ih možemo predvideti, dok na broj hladnih grupa u radu možemo uticati. Kriva opterećenja ima dva dnevna maksimuma i to oko 12h i oko 20h te minimum oko 04h. Energetski transformatori zbog velike mase imaju velik toplotni kapacitet tako da je promena temperature transformatora inertna. Po tim podacima moguće je predvideti krivu zagrevanja transformatora i hlađenje transformatora uključivati pre pojave visokog opterećenja da bi se temperatura snizila pre pojave opterećenja (iskoristiti veliki toplotni kapacitet transformatora)

Sistem za nadzor energetskog transformatora (je u mogućnosti da prati najtoplije tačke po fazi odnosno da prati ne samo vredost temperature već i trajanje termičkog opterećenja izolacije pojedine faze. Podaci o najtoplijim tačkama pojedinih faza se koriste za izračunavanje kumulativnog starenja po fazi.

Usled nečistoća koje se sakupljaju na radiatoru hladnih grupa otežava se hlađenje. Problem je rešavan isključenjem energetskog transformatora i pranjem radiatora vodom pod pritiskom. Ovakav postupak se radi prilikom remonta energetski transformatora odnosno jednom godišnje. Usled toga jedino neposredno posle pranja radiatori funkcionišu maksimalno efikasno. Termo slika uvek uključuje jednu hladnu grupu ta hladna grupa se najviše prlja i smanjuje efikasnost rada. Usled toga dešava se da hladna grupa koja najviše radi ima najmanju efikasnost rada. Sistem za nadzor može detektovati pad efikasnosti radiatora upoređivanjem temperatura ulja na ulazu, izlazu i temperaturu ambijenta. Nakupljena nečistoća može se odstraniti povremenim reverziranjem motora ventilatora odnosno promenom smera strujanja vazduha. Reorganizacijom hladnih grupa dobijamo da su najniži ventilatori najopterećeniji sa maksimalnim skupljanjem nečistoća na radiatorima a njihovo čišćenje je moguće i bez isključenja energetskog transformatora.

Na višim temperaturama voda migrira iz papirne izolacije u ulje, do tačke zasićenja ulja vodom za tu temperaturu. Odnose vode u papiru i ulju za različite temperature prikazuje Ommen dijagram. U transformatorima može postojati i nekoliko stotina litara vode. Padom temperature pada i tačka zasićenja ulja vodom tako da dolazi do oslobađanja slobodne vode. Proces prelaska vode iz ulja u papir je spor i ukoliko dođe do naglog pada temperature ulja može doći do otpuštanja veće količine vode u transformatoru koja nije uspela da se rasporedi odnosno adsorbuje u papirnoj izolaciji. Slobodna voda je teža od ulja i spušta se u donje zone transformatora. Takva slobodna voda lokalno drastično ruši izolaciju i moguće je da dođe do proboja unutar transformatora odnosno iznenadne "smrti" transformatora. Sistem hlađenja mora prepoznati uslove naglog pada temperature te smanjiti hlađenje da bi ne bi došlo do izdvajanja slobodne vode. Uslovi za iznenadnu smrt transformatora su kiša pri zagrejanom transformatoru, nagli pad opterećenja pri hladnom vremenu, isključenje opterećenog transformatora pa ponovno uključjenje, ili uključjenje transformatora pri dužem stajanju i hladnom vremenu.



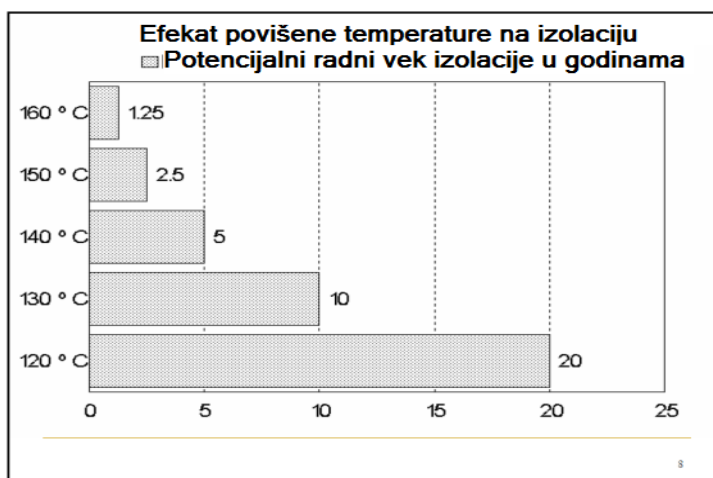
Slika 7. Ommen dijagram

Migracija vode između izolacionog papira i ulja je dugotrajan proces. Za svaku temperaturu postoji ravnoteža između vode u ulju i vode izolacionom papiru. Taj odnos prikazuje Ommen dijagram na slici 7. Problem ne postoji ukoliko je promena temperature spora takva da je proces promene temperature u vremenskoj ravnoteži sa adsorcijom vode u papirnoj izolaciji.

Rad hlađenja transformatora u trenutku naglog pada temperature može da pospeši pojavu izdvajanja vode iz ulja komepada temperatura. Zaključak je da postoje uslovi kad je potrebno isključiti (ili ograničiti) hlađenje transformatora i po cenu povećanja temperature najtoplije tačke i starenja transformatora. Ovakav problem je naročito izražen kod starijih transformatora gde usled degradacije celuloze postoji značajna količina vode u sistemu izolacije.

5. ZAKLJUČAK

Nižom radnom temperaturom dobijamo duži životni vek energetskega transformatora (slika 8) tako da pri razmatranju rada energetskega transformatora pored gubitaka električne energije možemo govoriti i o gubitku odnosno trošku izolacije. Odnos utroška izolacije na nominalnoj temperaturi i nekoj posmatranoj predstavlja koeficijent trošenja izolacije.



Slika 8. Promene životnog veka papirne izolacije energetskega transformatora pri porastu temperature [5]

Tabela 1 prikazuje da je broj kvarova i troškovi održavanja transformatora preko 50% u domenu kvarova izolacije

Tabela 2. Vrsta kvara, broj kvarova i troškovi [6]

Uzrok kvara	Broj	Troškovi (US \$)
Kvar izolacije	24	\$ 149 967 277
Dizajn, materijal	22	\$ 64 696 051
Nepoznato	15	\$ 29 776 245
Kontaminacija ulja	4	\$ 11 836 367
Preopterećenje	5	\$ 8 568 768
Eksplozija i požar	3	\$ 8 045 771
Kratki spoj	4	\$ 4 959 691
Manipulacija	5	\$ 3 518 783
Poplava	2	\$ 2 240 198
Veze	6	\$ 2 186 725
Udar groma	3	\$ 657 935
Vlaga	1	\$ 175 000
UKUPNO	94	\$ 286 628 811

Logičan zaključak je da svaka promena koja doprinosi smanjenju trošenja izolacije direktno utiče na pad troškova, smanjenje broja kvarova i povećanje pouzdanosti sistema.

LITERATURA

[1] <http://www.econline.com/doc/siemens-allows-for-the-detection-of-faults-in-0001> 20.8.2023

[2] CIGRE WG A2.18, Guide for life management techniques for power transformers. www.buenomak.com.br, jun 2003 godine.

[3] J. Crossey, E. A. Mackenzi, United Kingdom Next generation on-line monitoring and diagnostics for power transformers, www.cigre-gcc.org/wp-content/.../paper-501.pdf, Septembar 2012 godine

[4] Anisim Dolin (Petrovič), Sergej Otmorskij (Georgijevič), Valerij Aleksandrov, Iskustva u vezi sa kapitalnim remontima transformatora na mestu ugradnje uz primenu savremenih i unikatnih tehnologija, Tehno servis elektro, CIGRE, Moskva Ruska Federacija, 2011. Godine.

[5] Branka Bošković, Slađana Teslić, Jelena Lukić Voda u izolacionom sistemu energetskih energetski transformatora, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla”, Zbornik radova br.19, Beograd, 2008-2009 godine, str 287-297.

[6] William H. Bartley P.E. Analysis of Transformer Failures The Hartford Steam Inspection & Insurance Co Boiler, Intern. Ass. of Engineering Insurers Annual Conf. 36th, Stockholm, 2003