

SUVREMENA RJEŠENJA U DISTRIBUTIVNIM TRANSFORMATORIMA

B. Ćučić, Končar-Distributivni i specijalni transformatori d.d., Hrvatska
M. Mikulić, Končar-Distributivni i specijalni transformatori d.d., Hrvatska
M. Mihaljević, Končar-Distributivni i specijalni transformatori d.d., Hrvatska

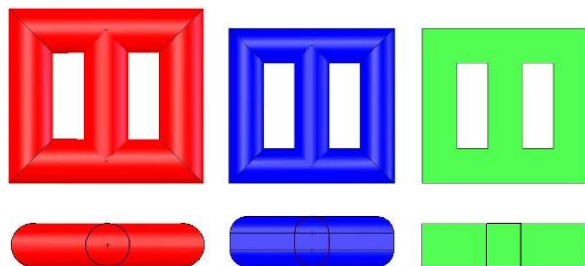
UVOD

Iako današnji transformatori rade na istim principima kao i oni prije mnogo desetaka godina, sve veći zahtjevi na gubitke i buku te stalni presing na snižavanje cijena transformatora postavljaju sve složenije zadatke za proizvođače distributivnih transformatora. Dodatne poteškoće predstavljaju i velike fluktuacije u cijeni osnovnih materijala, prije svega bakra. Zbog toga je bilo potrebno napraviti iskorake po pitanju optimalnog projektnog rješenja (oblik presjeka stupa jezgre i namota, vrste materijala u namotu, kapitalizacija) koji su za sobom povukli i nužne tehnološke iskorake. Tako se na primjer danas velika većina distributivnih transformatora radi s ovalnom izvedbom namota koja za posljedicu ima povećana dinamička naprezanja uslijed sila kratkog spoja u odnosu na transformatore s tradicionalnim okruglim namotima. Radi kompenzacije povećanih naprezanja nužna je upotreba tzv. dijamantnog papira kao slojne izolacije. Dijamantni papir pak zahtijeva precizno kontrolirani termički tretman za vrijeme procesa sušenja transformatora, što je jedino moguće ostvariti u postrojenju za sušenje strujama niske frekvencije (eng. LFH – low frequency heating).

U referatu će se najprije analizirati optimalni oblik presjeka stupa jezgre, zatim će se opisati izvedbe jezgri i namota. Nakon toga opisat će se metode sušenja, izvedbe kotla i obraditi tema kapitalizacije. Na kraju će se dati pregled zaštitnih uređaja na distributivnim transformatorima.

OBLIK PRESJEKA STUPA I NAMOTA

Slika 1 prikazuje usporedbu jezgara s okruglim, ovalnim i pravokutnim presjekom stupa (i jarma) i to tako da sve tri jezgre imaju iste dimenzije prozora i isti presjek stupa. Za istu indukciju u jezgri, jezgra s pravokutnim presjekom je najpovoljnija po pitanju mase i gubitaka praznog hoda, slijedi jezgra s ovalnim presjekom, i na kraju jezgra s okruglim presjekom stupa.



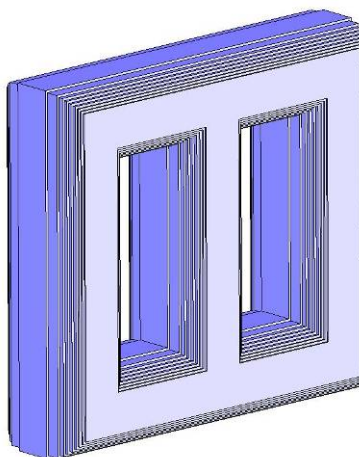
Slika 1. Usporedba jezgara s okruglim, ovalnim i pravokutnim presjekom stupa

Ovalna jezgra u odnosu na okruglu donosi uštedu u širini i visini jezgre, dok pravokutna u odnosu na ovalnu donosi uštedu u trećoj dimenziji; debljini. Zbog toga prelaz s okrugle na ovalnu jezgru donosi znatno više nego prelazak s ovalne jezgre na pravokutnu.

Transformatori s pravokutnim presjekom stupa su tehnološki najzahtjevniji i najnepovoljniji po pitanju naprezanja na sile kratkog spoja pa se oni koriste samo na manjim snagama (do 200 kVA) jer su tamo sile najmanje. Transformatori s ovalnim presjekom stupa znatno su tehnološki napredniji, a problem povećanih naprezanja na sile kratkog spoja rješava se upotrebom dijamantnog papira kao slojne izolacije, kvalitetnim namatanjem i polimerizacijom navedenog papira tijekom procesa sušenja. Transformatori s ovalom jezgrom (s istim snagama, naponima, gubicima i naponima kratkog spoja) su za prosječno 10 % lakši od transformatora s okruglom jezgrom. To su razlozi zašto se glavina današnjih distributivnih transformatora (od 200 do 1250 kVA) proizvodi s ovalnim presjekom stupa i namota.

IZVEDBE JEZGRI

Europski proizvođači transformatora danas najčešće proizvode transformatore s trofaznim trostupnim step-lap jezgrama (slika 2).



Slika 2. Trofazna trostupna slagana jezgra u ovalnoj izvedbi

Vrlo mali broj proizvođača radi jezgre s motanim, umjesto slaganim jezgrama, a mogu se naći i motane prostorne jezgre. Nedostatak transformatora s motanom jezgrom je problematično skidanje namota s jezgre u slučaju popravka.

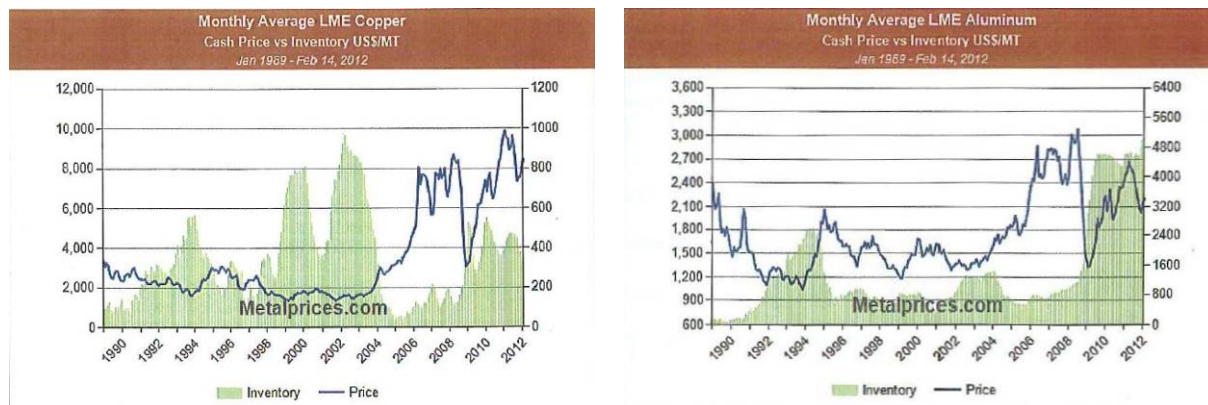
Za izradu jezgara danas se koriste hladno valjani magnetski orijentirani limovi. Najčešće su to M5 debljine 0.3 mm, M0H u debljinama 0.3 i 0.27 mm, te laserski tretirani limovi u debljinama 0.27 i 0.23 mm. Pri indukciji 1.7 Tesla i frekvenciji 50 Hz, tipični gubici navedenih limova kreću se od 1.22 W/kg (za M5) pa do 0.78 W/kg (za laser 0.23 mm). Što se tiče buke, transformatori s laserskim limovima imaju najmanje vrijednosti buke. Nivoi buke i gubitaka transformatora dani su u standardu EN50464-1 (1), ali osim toga, razina buke često ovisi i o zakonskim regulativama u pojedinim zemljama. Tako se npr. u Austriji i Njemačkoj često zahtijeva da transformator ima za nekoliko dB nižu buku u odnosu na nivo A_0 definiran standardom.

U posljednje vrijeme pojavljuju se i motane jezgre od amornog materijala. Odlika takvih jezgri je da je moguće postići znatno niže gubitke praznog hoda nego kod jezgara s magnetski orijentiranim limovima. Iako amorfne jezgre mogu imati i 50 % niže gubitke u jezgri u odnosu na najniže gubitke razine A_0 (1) koji se postižu u jezgrama s laserskim 0.23 mm limom, buka transformatora s amornim jezgrama se teško može spustiti ispod razine C_0 . Također amorfni materijal je vrlo krhak i osjetljiv na mehaničke manipulacije budući da je oko 10 puta tanji od laserskog lima. Transformatori s amornim jezgrama su teži, veći po dimenzijama i skuplji od klasičnih distributivnih transformatora te su oni za sada konkurentni uglavnom na tržištima s frekvencijom 60 Hz (32 % veći gubici P_0 nego pri 50 Hz) i na tržištima na kojima se traže jednofazni ili trofazni transformatori izvedeni iz tri jednofazne jedinice zasebno. U Europi, amorfni transformatori su u zadnjih nekoliko godina u postupku ekonomske valorizacije od strane francuskog EDF-a. Dosadašnje analize nisu pokazale njihovu ekonomsku opravdanost (Elleau, 2).

IZVEDBE NAMOTA

Oblik namota uvijek slijedi oblik presjeka stupa; dakle, namoti distributivnih transformatora mogu biti okrugli, ovalni ili pravokutni.

Iako se za vodiče donedavno upotrebljavao uglavnom samo bakar, porast cijene bakra i njezina velika fluktuacija nameću korištenje aluminija kao ekonomski opravdanijeg materijala bez obzira na njegovu lošiju električnu vodljivost (pri 20 °C vodljivost aluminija je približno 36 MS/m, a vodljivost bakra 57 MS/m). Slika 3 prikazuje cijene bakra i aluminija u periodu od 1989. do 2012. godine prema LME-u.



Slika 3. Fluktuacija cijena bakra i aluminija u periodu 1989-2012. godine prema LME-u. Cijene su izražene u USD/MT i očitavaju se uz lijevi rub slike.

Lošija vodljivost aluminija kompenzira se njegovom manjom specifičnom težinom (gustoća aluminija je 2700 kg/m³, a bakra 8900 kg/m³). Ako se u obzir uzme i cijena prerade, koja je znatno veća za aluminij nego za bakar, aluminijски vodiči su još uvijek za oko 2 puta jeftiniji od bakrenih pa su danas transformatori s aluminijским namotima za oko 10 % jeftiniji od transformatora s bakrenim namotima. Od vodiča, za niskonaponske (NN) namote koriste se profil ili folija, a za visokonaponske (VN) lakirana okrugla žica ili profil.

Uz već spomenuti dijamantni papir, otpornosti transformatora na kratki spoj pomažu i namatalice s kontroliranim zatezanjem izolacije i žice te korištenje slojne izolacije u VN namotu u obliku traka (slika 4). Takvi namoti znatno su kompaktniji i čvršći od klasičnih namota koji se rade s izolacijom čija je visina jednaka visini namota.



Slika 4. Proces namatanja VN namota sa izolacijom u trakama od dijamantnog papira

SUŠENJE TRANSFORMATORA

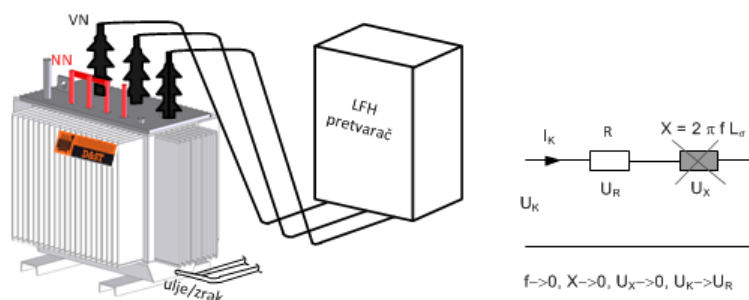
Poznato je da nedovoljno osušena izolacija potiče njezino starenje, tj. slabljenje mehaničkih i dielektričnih svojstava izolacije što u konačnici znači manji životni vijek transformatora. Tako npr. izolacija s 4 % vlage stari 20 puta brže od izolacije s 0.5 % vlage. Upravo je udio vlage u izolaciji od 0.5 % granična vrijednost kod koje se danas smatra da je transformator dobro osušen (3). Za sušenje distributivnih transformatora, danas se koriste dvije metode.

Prva od njih je klasična u kojoj se aktivni dio (jezgra s namotima) suši pomoću vrućeg zraka u vakuumskoj komori (slika 5). Proces sušenja odvija se u nekoliko ciklusa. U svakom ciklusu izolacija se najprije zagrijava pri atmosferskom tlaku, a nakon toga vakuumira.



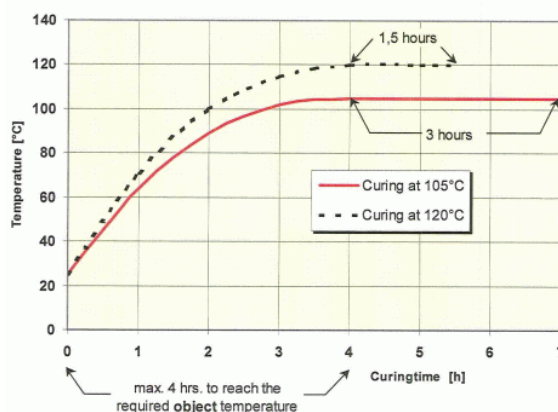
Slika 5. Klasična metoda sušenja aktivnog dijela transformatora u vakuumskoj komori.

U zadnjih petnaestak godina koristi se i druga metoda sušenja distributivnih transformatora, a to je metoda sušenja strujama niske frekvencije (eng. LFH – low frequency heating) (Čučić, 4). Navedena metoda se bazira na grijanju namota u pokusu kratkog spoja pri sniženoj frekvenciji i tlaku (slika 6). LFH proces u širem smislu obuhvaća sušenje, vakumiranje, i na kraju punjenje transformatora željenom vrstom ulja pod vakuumom. Za svaku vrstu ulja postoji poseban cjevovod pa se svaki transformator u LFH procesu može istovremeno puniti željenom vrstom ulja (mineralno, silikonsko ili estersko ulje).



Slika 6. Princip sušenja transformatora pomoću LFH metode

Primjena LFH metode koincidira s primjenom dijamantnog papira kao slojne izolacije. Naime, taj papir, koji se koristi za kompenzaciju povećanih napreznja u namotima uslijed dinamičkih sila kratkog spoja, zahtijeva odgovarajući termički tretman za vrijeme procesa sušenja transformatora. Prema slici 7, da bi se dva susjedna sloja dijamantnog papira međusobno slijepila i tako pridonijela krutosti namota, potrebno ih je držati 1.5 sat na temperaturi 120 °C ili 3 sata na temperaturi 105 °C. Pri tome je temperaturu polimerizacije (minimalno 105 °C) potrebno postići najkasnije u roku 4 sata.



Slika 7. Vremena potrebna za polimerizaciju dijamantnog papira (Krempel)

Svim ovim zahtjevima najbolje odgovara LFH metoda u kojoj se toplinska energija potrebna za sušenje razvija upravo tamo gdje treba, dakle u namotima, pa se potrebna temperatura polimerizacije postiže već za oko 1 sat. Prednost je i jednoliko progrijavanje izolacije, odnosno jednoliki raspored temperature po izolaciji u radijalnom i aksijalnom smjeru. Nasuprot tome, u klasičnom postupku sušenja u kojem toplina dolazi izvana, vanjski slojevi izolacije imaju veću temperaturu, pa se najčešće dešava da unutrašnji slojevi izolacije (koji su najbitniji) nisu dobro polimerizirani. Također je problematično postizanje temperature polimerizacije u zadanom roku od 4 sata. Time je i upitna funkcija dijamantnog papira, odnosno ponašanje transformatora u kratkom spoju. Naime, kod transformatora s folijskim namotima na NN strani, dominantni problem su naprezanja uslijed radijalnih sila. Budući da se takvi namoti najčešće izvode kao ovalni, gotovo jedini način rješavanja problema povećanih naprezanja je tehnološka osposobljenost, tj. kvalitetno namatanje i dobra polimerizacija namota na način da se za izolaciju koristi dijamantni papir, da se žica i izolacija kontrolirano zatežu, da se na VN namotu izolacija radi iz traka (slika 4), i konačno da se svi slojevi papira međusobno dobro slijepe (polimeriziraju) u procesu sušenja. Izostavljanjem bilo čega od navedenog znatno se povećava rizik od stradavanja namota tokom eksploatacije transformatora.

Na manjim transformatorima (50, 100 i 160 kVA) na kojima se na NN strani koristi u pravilu profilni vodič, dominantni problem su aksijalne sile i tu je bitno da je namot dobro aksijalno stlačen.

IZVEDBE KOTLA

Dvije najčešće izvedbe kotla kod distributivnih transformatora su kotao s konzervatorom i valovitim stranicama (slika 8) i hermetički zatvoreni kotao s valovitim stranicama (slika 9). Danas se u većini slučajeva za distributivne transformatore do 1600 kVA koriste hermetički zatvoreni kotlovi. Prednost im je da kod njih nema doticaja izolacijskog medija sa zrakom te generalno ne zahtijevaju nikakvo održavanje osim standardnih provjera razine ulja i opreme za signalizaciju. Tendencija je da se takvi kotlovi koriste i na većim snagama. Najveći transformator s hermetički zatvorenim kotlom s valovitim stranicama koji je Končar D&ST napravio imao je snagu 4 MVA i isporučen je za stranog naručitelja.

Valovite stranice hermetički zatvorenih transformatora izrađene su iz valovitog lima. U ovisnosti o veličini transformatora debljine stranica mogu biti 1, 1.25 ili 1.5 mm, dok se njihova visina kreće od 500 do 1600 mm, a dubina od 50 do 400 mm. Maksimalni pritisci u kotlu pri radu hermetički zatvorenih transformatora ne prelaze 25 kPa (0.25 bar). Valovite stranice hermetičkih transformatora imaju dvostruku ulogu; hlađenje transformatora i kompenzaciju povećanja (smanjenja) volumena ulja zbog porasta (smanjenja) temperature. Kod transformatora manjih snaga kotlovi se dimenzioniraju prema povećanju volumena ulja. Zbog toga su kotlovi manjih snaga uglavnom asimetrični, tj. različite su dubine rebara na dužim stranama kotla. Za kompenzaciju povećanja volumena ulja u pravilu je dovoljno da se dublja rebra nalaze na samo jednoj dužoj strani kotla, dok se na ostale tri strane nalaze plića rebra. Transformatori snage 400 kVA i veći najčešće imaju simetrična hladila jer se valovite stranice dimenzioniraju prema hlađenju.



Slika 8. Kotao s konzervatorom



Slika 9. Hermetički zatvoreni valoviti kotao

Širenje i skupljanje ulja u hermetički zatvorenom kotlu uslijed promjene temperature ulja uzrokuje nadtlak ili podtlak, a to izaziva deformacije i naprezanja u kotlu. Budući da se temperatura ulja stalno mijenja ovisno o opterećenju transformatora i vanjskoj temperaturi, temperaturna naprezanja se dešavaju ciklički i izazivaju niskociklički zamor u materijalu kotla.

Kako bi se dokazala njihova mehanička izdržljivost, hermetički zatvoreni valoviti kotlovi se ispituju prema standardu EN 50464-4 (5) (slika 10). Godišnje i dnevne promjene temperature simuliraju se promjenom tlaka u transformatorskom kotlu, tj. promjenom količine ulja čime se u kotlu stvara nadtlak ili podtlak. Standard definira da se kotao ispituje najprije sa 2000 ciklusa u ekstremnom režimu (najniža temperatura -25 C, najviša temperatura 88 C), a nakon toga na statički tlak iznosa 1.2 puta većeg od najvećeg radnog tlaka u kotlu i to u trajanju od 24 sata. Kotao koji zadovolji ispitivanja smatra se da ima mehaničku izdržljivost na ciklička opterećenja za cijeli životni vijek (30 godina).



Slika 10. Ispitivanje hermetički zatvorenog kotla na ciklička opterećenja

KAPITALIZACIJA

Osnovna cijena transformatora je prodajna cijena koja izražava vrijednost samog transformatora, dok kapitalizirana cijena dodatno uzima u obzir i cijene gubitaka. Transformator može biti optimiran prema osnovnoj ili kapitaliziranoj cijeni, ovisno o tome da li kupac definira gubitke ili cijene gubitaka.

Ako kupac definira gubitke, što su oni niži, cijena transformatora je viša. Prema EN50464-1 (1), gubici tereta Pk dani su u 4 grupe (Ak, Bk, Ck i Dk), dok su gubici praznog hoda Po dani u 5 grupa (Ao, Bo, Co, Do i Eo). Ak i Ao označavaju najniže gubitke, a Dk i Eo najviše. Na području JI Europe, transformatori se uglavnom ne kapitaliziraju, a kupci najčešće definiraju razine gubitaka Co-Ck (BiH Co-Ck, Bugarska Co-Ck, Grčka Co-Ck i Bo-Ck, Hrvatska Co-Ck, Makedonija Co-Ck i Bo-Bk, Slovenija Co-Ck i Srbija Co-Bk).

Kad kupac definira cijene gubitaka, tada se kapitalizirana cijena transformatora sastoji od dvije komponente: osnovne cijene transformatora i troškova eksploatacije transformatora za vrijeme njegove životne dobi, što se izražava sljedećom formulom:

$$CT = OCT + A \times Pk + B \times Po$$

gdje je:

- CT – kapitalizirana cijena transformatora [€]
- OCT – osnovna, tj. prodajna cijena transformatora [€]
- A – cijena gubitaka tereta [€/kW]
- Pk – gubici tereta [kW]
- B – cijena gubitaka praznog hoda [€/kW]
- Po – gubici praznog hoda [kW]

Više cijene gubitaka A i B znače višu osnovnu cijenu transformatora, ali i niže vrijednosti gubitaka Pk i Po, a time i niže troškove eksploatacije. Izraz $A \times Pk + B \times Po$ zapravo daje približnu ekvivalentnu sadašnju cijenu budućih troškova eksploatacije transformatora za cijelu njegovu životnu dob. Kapitalizacijske faktore A i B definira kupac, a oni ovise o kamatnoj stopi, životnoj dobi transformatora, cijeni kWh električne energije i opterećenju transformatora. U praksi se cijena gubitaka tereta (A) kreće od 0.2 do 3 €/W, a cijena gubitaka praznog hoda (B) od 1 do 15 €/W.

PREGLED ZAŠTITNIH UREĐAJA NA DISTRIBUTIVNIM TRANSFORMATORIMA

Zaštitni uređaji na hermetički zatvorenim transformatorima

U ovisnosti o snazi, hermetički zatvoreni transformatori se dijele na stupne transformatore (do uključivo 250 kVA) i transformatore za trafostanice (400 kVA i veći).

Stupni transformatori za zaštitu koriste odušnik (slika 11). Odušnik se dizajnirana tako da je njegova prorađna vrijednost (obično 40 kPA) manja od čvrstoće kotla. Aktivira se u slučaju naglog povećanja pritiska u kotlu transformatora da bi se spriječilo njegovo uništenje.



Slika 11. Odušnik

Transformatori za trafostanice osim odušnika mogu imati kontaktni termometar, uljokaz (magnetski ili optički), a na većim snagama ponekad se koristi kombinirani zaštitni uređaj (npr. R.I.S ili DGPT2).

Kontaktni termometar (slika 12) je uređaj koji detektira temperaturu ulja u transformatoru. Smješten je u džepu za termometar. Opremljen je s dva električna kontakta (alarm i isklup) kao i pokazivačem maksimalne temperature.



Slika 12. Kontaktni termometar

Magnetski uljokaz (slika 13) ugrađuje se u cijev za punjenje. Ima mogućnost detektiranja curenja ulja i akumuliranja plinova ili zraka ispod poklopca transformatora. Veza između indikatora nivoa ulja i pokazivača je magnetska tako da se spriječi curenje ulja.



Slika 13. Magnetski uljokaz

Optički uljokaz (slika 14) vizualno pokazuje napunjenost transformatora uljem. „Prozor“ je obično napravljen od stakla i u uljokazu pliva kuglica koja mora biti u gornjem položaju.



Slika 14. Optički uljokaz

Kombinirani zaštitni uređaj (slika 15) objedinjuje odušnik s kontaktima, kontaktni termometar i uljokaz s kontaktima. Ujedno postoji mogućnost uzimanja plina. Generalno se upotrebljava na transformatorima 1600 kVA i većim.



Slika 15. Kombinirani zaštitni uređaj

Zaštitni uređaji na distributivnim transformatorima koji imaju konzervator

Transformatori s konzervatorom imaju sušionik zraka (slika 16), uljokaz na konzervatoru (slika 17), a mogu imati plinski relej (Buchholz) (slika 17) i kontaktni termometar. Buchholz relej služi za signalizaciju i isklapanje transformatora u slučaju razvijanja plina, gubitka ulja ili naglog porasta pritiska uslijed kvara u transformatoru.



Slika 16. Sušionik zraka



Slika 17. Plinski relej (Buchholz) i uljokaz na konzervatoru

Zaštitni uređaji ugrađuju se na transformator prema zahtjevu kupca.

ZAKLJUČAK

Danas najčešće korišteni ovalni oblik namota u odnosu na tradicionalni kružni oblik daju manju masu i manje dimenzije transformatora, ali izaziva veća naprezanja namota na sile kratkog spoja. Stoga je neophodna kompenzacija naprezanja upotrebom dijamanalnog papira, kontroliranog zatezanja izolacije i žice za vrijeme namatanja, te korištenjem izolacije u trakama. Da bi navedeni dijamanalni papir uspješno kompenzirao povećana naprezanja međusobnim lijepljenjem susjednih slojeva, potrebna je vrlo precizna kontrola temperature izolacije u namotu tijekom procesa sušenja što je praktički jedino moguće ostvariti u postrojenju za sušenje strujama niske frekvencije. Izostavljanjem bilo čega od navedenog znatno se povećava rizik od stradavanja namota tokom eksploatacije transformatora. Transformatori s aluminijskim namotima danas se sve više koriste zbog visoke cijene bakra i njezine velike fluktuacije.

Danas se u većini slučajeva za distributivne transformatore do 1600 kVA koriste hermetički zatvoreni kotlovi. Prednost im je u tome da nema doticaja izolacijskog medija sa zrakom te generalno ne zahtijevaju nikakvo održavanje osim standardnih provjera curenja ulja i opreme za signalizaciju.

LITERATURA

1. Europska norma EN50464-1:2007, "Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - Part 1: General requirements"
2. Elleau C. et al., "Amorphous distribution transformers test campaign", 21st International Conference on Electricity Distribution Frankfurt, 6-9 June 2011
3. "Weidman electrical technology", Weidmann systems international AG, edition april 2003.
4. Čučić B, Šolaja J, 2011, "Sušenje distribucijskih transformatora strujama niske frekvencije", 10. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 6. – 10.11.2011.
5. Europska norma EN50464-4:2007, "Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - Part 4: Requirements and tests concerning pressurised corrugated tanks"

Branimir Čučić

Končar-Distributivni i specijalni transformatori d.d., Mokrovićeva 8, 10090 Zagreb

Tel: +385 1 3783 758, Mob: +385 99 3134 406, e-mail: branimir.cucic@koncar-dst.hr