

REVITALIZACIJA PAPIRNO/ULJNE IZOLACIJE U FUNKCIJI PRODUŽENJA ŽIVOTNOG VEKA TRANSFORMATORA

J.Lukić, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

S.Teslić,

J.Savić,

S.Daković,

S.Milosavljević,

R.Đukanović,

M.Antić,

M.Veličković

Kratak sadržaj: U radu je opisan koncept primene dijagnostičkih metoda ispitivanja izolacionih sistema (IS) primenjenih u preventivnom održavanju i primena korektivnih mera revitalizacije papirno-uljnog izolacionog sistema u cilju produženja životnog veka energetskih transformatora. Dijagnostika stanja, preporuke za primenu odgovarajućih mera i izbor odgovarajuće tehnologije revitalizacije papirno-uljne izolacije definiše se u skladu sa konstrukcijom, godinama pogona, istorijatom rada, dijagnostikom stanja, pozicijom i značajem transformatora u sistemu. U radu su prikazani rezultati sušenja izolacionog sistema (IS) u vakuum tehnici metodom „uljnog spreja“ i korelacija mernih metoda određivanja sadržaja vode u izolacionom sistemu: Karl-Fisher metoda spregnuta sa ravnotežnim dijagramima i RVM metode. Za stare transformatore čiji sud neizdržava vakuum razvijena je tehnologija INT-NFHT koja koristi azot kao drugi radni fluid i optimizovana je u laboratorijskoj simulaciji procesnih parametara. Rezultati revitalizacije IS primenom hemijske regeneracije ulja i sušenja čvrste izolacije primenom inovirane tehnologije za transformatore čiji sud ne izdržava vakuum INT-NFHT, uz prikaz rezultata on-line kontrolnih ispitivanja sadržaja vode u ulju tokom procesa prikazani su kroz primer revitalizacije IS transformatora sa HE koji je u eksploataciji 46 godina. Proces revitalizacije izolacionog sistema verifikovan je na osnovu rezultata električnih (otporni izolacije, faktor dielektričnih gubitaka IS, indeksi polarizacije) i hemijskih (fizčkih, hemijske i električne karakteristike ulja) pre i nakon revitalizacije, uz određivanje oksidacione stabilnosti u laboratorijskoj simulaciji veštačkog starenja ulja prema metodi IEC 61125 B, u cilju procene budućeg radnog veka regenerisanog ulja.

Ključne reči: papirno/uljna izolacija, revitalizacija, dijagnostika stanja, regeneracija ulja, sušenje izolacionog sistema.

UVOD

Dijagnostika stanja izolacionog sistema transformatora u skladu sa povećanim zahtevima za proizvodnjom električne energije sa jedne strane i visokom prosečnom starošću transformatora sa druge predstavlja jedan od primarnih zadataka u održavanju EES. Koncept periodičnog ispitivanja prema

naponskom nivou je u poslednjoj deceniji potisnut primenom koncepta zasnovanog prema „uvidu u stanje“ (eng. Condition based monitoring – CBM). Ispitivanjem sadržaja gasova, vode i furana rastvorenih ulju, fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja dobija se uvid u pogonsko stanje izolacionog sistema (IS) i u velikom broju slučajeva uvid u pogonsko stanje transformatora. Hemijska ispitivanja spregnuta sa električnim merenjima daju kompletnu dijagnostiku stanja ET.

Na osnovu analize rezultata dijagnostičkih ispitivanja procenjuje se životni vek IS i mogućnosti njegovog produženja primenom korektivnih mera - postupaka revitalizacije, koji mogu da obuhvataju sledeće:

- fizičku obradu ulja (sušenje, degazaciju, filtraciju),
- hemijsku regeneraciju (hemijska adsorpcija polarnih produkata starenja i vode),
- inhibiranje ulja
- sušenje i ispiranje čvrste izolacije,
- pasivizaciju bakarnih površina u aktivnom delu transformatora.

Prilikom planiranja korektivnih mera pored rezultata dijagnostičkih ispitivanja analizira se istorijat rada transformatora, njegovo mesto i značaj u sistemu, konstrukcija, godine pogona uzimajući u obzir tehnokonomске parametre. U skladu sa postojećim stanjem preporučuje se odgovarajući tehnološki postupak revitalizacije IS. Optimizacija procesnih parametara se vrši u laboratorijskim ispitivanjima i simulacionim testovima, nakon kojih se definišu optimalni parametri za izvođenje postupka na terenu. Ona se sastoji od ispitivanja graničnih vrednosti temperature i pritiska koji se mogu primeniti a da se istovremeno ne degradira papirno-uljna izolacija, što se utvrđuje primenom analitičkih metoda pri datim uslovima pritiska i temperature: merenje sadržaja vode u ulju i papiru metodom Karl-Fisher, merenje stepena polimerizacije papira (mera mehaničke čvrstoće i stepena degradacije papira), sadržaj furana u ulju (produkti degradacije papira) i infracrvena spektrofotometrija (produkti degradacije ulja). Postupci hemijske regeneracije takođe uključuju laboratorijske simulacije na osnovu kojih se dobija uvid u efikasnost izvođenja procesa na terenu i kvalitet regenerisanog ulja. Rezultati laboratorijskih proba daju preliminarne rezultate efikasnosti izvođenja procesa na terenu.

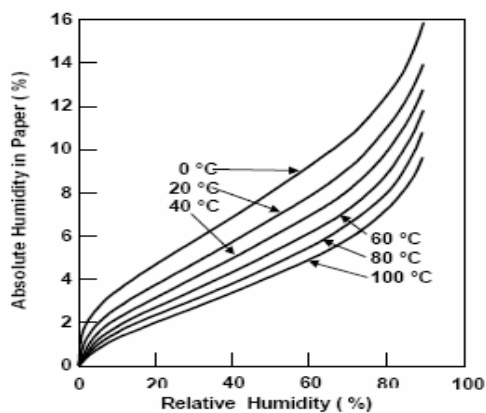
POSTUPCI REVITALIZACIJE PAPIRNO-ULJNOG IZOLACIONOG SISTEMA

Tokom eksploatacionog veka transformatora proces degradacije papirno-uljne izolacije se dešava određenom brzinom zavisno od stepena opterećenja transformatora, eventualno prisutih termičkih i/ili električnih naprezanja i pojave drugih defekata u konstrukciji transformatora. Zavisno od koncepcije praćenja pogonskog stanja (periodičnog ili uvidom u stanje) prate se promene u brzini i intenzitetu degradacije papirno-uljne izolacije merenjem većeg broja karakteristika IS. Ispitivanjem ulja mogu se pratiti promene u brzini degradacije ulja i celulozne izolacije. Kada pojedine karakteristike dostignu granične vrednosti preporučuju se korektivne mere. Povišen faktor dielektričnih gubitaka, sadržaj vode, kiselina i furana u ulju, uz snižene vrednosti otpora izolacije i indeksa polarizacije su parametri koji ukazuju na potrebu revitalizacije IS. Nezavisno od vrste primenjenog tretmana ulja, ispiranje i sušenje čvrste izolacije je sastavni deo svih procesa revitalizacije, jer je najveći deo vode i polarnih komponenti degradacije IS skladišten u celuloznoj izolaciji, koja je inače po svojoj strukturi i hemijskom sastavu termički i hidrolitički manje stabilna od ulja. To znači da povišen sadržaj vode i kiselina u IS jako utiče na povećanje brzine degradacije celulozne izolacije, kao i temperature veće od 98°C, dok je pri istim uslovima ulje u manjoj meri ugroženo. Kiseonik i površina bakra kao katalizator oksidacije, uz temperaturu, iznad 140°C predstavlja ključni promoter degradacije ulja. U ovom kontekstu veoma je važno prilikom primene određenih tehnoloških postupaka voditi računa o maksimalno dozvoljenim procesnim temperaturama.

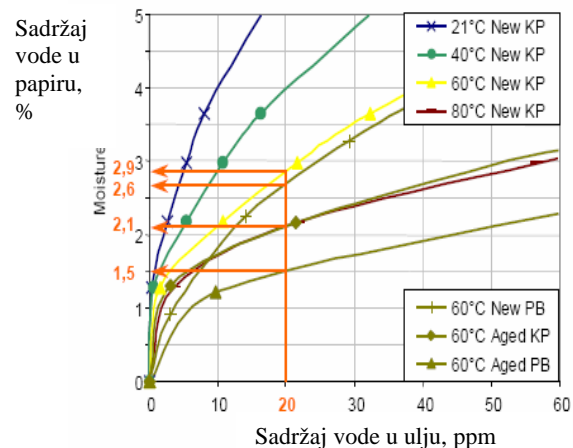
PROCESI SUŠENJA IZOLACIONOG SISTEMA

Osnovni parametri procesa sušenja IS su: temperatura, pritisak i koncentracija vode u papirno-uljnoj izolaciji. Povišene temperature promovišu velike brzine uklanjanja vode iz čvrste izolacije, jer je vremenska konstanta difuzije direktno proporcionalna temperaturi. Na primer, koeficijent difuzije na 70°C - $D_{AB}(70^\circ\text{C}) = 4.7 \times 10^{-12}$ je 100 puta veći nego na ambijentalnoj temperaturi, $D_{AB}(20^\circ\text{C}) = 8.5 \times 10^{-14}$. Za dostizanje istog sadržaja vode u čvrstoj izolaciji nakon procesa sušenja, potrebno vreme na ambijentalnoj temperaturi iznosi 336 sati, dok za proces na 70°C potrebno vreme iznosi 6 sati. Pad pritiska, tj. dubina

vakuuma predstavlja pogonsku silu sušenja, jer se primenom vakuuma obezbeđuje razlika u naponu pare vode izmedju celuloze i okolnog medijuma – ulja, pri čemu razlika pritiska zavisi od gradijenta koncentracije vode u čvrstoj izolaciji i ulju. Tokom procesa, ulje se kontinualno suši do niskog sadržaja vode, sa ciljem da se postigne najveći gradijent koncentracije vode u papirno-uljnoj izolaciji i time obezbedi maksimalan prenos vode iz čvrste izolacije u ulje. Kada se ostvari stabilan nizak vakuum može se izvršiti procena sadržaja vode u čvrstoj izolaciji korišćenjem Piper-ovog dijagrama. Procesi se najčešće izvode u više ciklusa. Kontinualnim merenjem sadržaja vode i relativnog stepena zasićenja (RS), sadržaja čestica u ulju i dielektrične čvrstoće ulja, adekvatno se prati tok procesa i dobija uvid u efikasnost procesa i dobijaju se mogućnosti za optimizaciju procesa, posebno sa aspekta vremena trajanja. Relativni stepen zasićenja vode u ulju (RS) je važan parametar za praćenje toka sušenja IS jer predstavlja „aktivnu vodu“, tj. fizički rastvorenu i adsorbovanu vodu u papiru i ulju koja se može procesima sušenja ukloniti i koja efektivno utiče na dielektrične osobine IS (slika 1a.). Za isti sadržaj vode u ulju, na osnovu ravnotežnih krivih, sadržaj vode u papiru je niži za ostarele nego za nove IS (slika 1b.) [2]. Razlog tome je činjenica da u ostarelim IS postoji veći broj produkata starenja koji sadrže hemijski vezanu vodu. Hemijski vezana voda se iz čvrste izolacije praktično ne može ukloniti, te je za IS koji imaju veći broj godina eksploatacije normalno očekivati blago povećanje apsolutnog sadržaja vode, koji ne utiče na dielektrične osobine. Prilikom sušenja i procene sadržaja vode starih transformatora ovu činjenicu treba uzeti u obzir.



Slika 1a) relativna vlažnost, % u zavisnosti od vlage u celuloznoj izolaciji



Slika 1b) Sadržaj vode u ulju u ppm u zavisnosti od vlage u celuloznoj izolaciji

Danas postoji više vakuum tehnika koje se mogu upotrebljavati u sudu transformatora:

- Metoda uljnog spreja
- metoda u parama rastvarača
- potapajuća metoda
- metoda grejanja niskom frekvencijom – (eng. low frequency heating, LFH).

„Metoda u parama rastvarača“ i tehnika „uljnog spreja“ su veoma efikasne i kratkotrajne, ali kao invazivne metode kod ostarelih IS mogu izazvati formiranje krutih presušanih površina na celulozi (smanjenje vrednosti DP). Ove metode su operativno zahtevnije i teže za izvođenje na licu mesta u pogonu, zbog tehnike raspršivanja uljnog spreja i mera protiv požarne zaštite u slučaju primene metode „u parama rastvarača“.

LFH tehnika u vakuumu je jedna od tehnika najveće efikasnosti, jer se čvrsta izolacija greje niskom frekvencijom iz unutrašnjih slojeva namotaja, pri čemu se voda efikasno uklanja iz najdubljih slojeva celulozne izolacije.

„Potapajuća metoda“ se često upotrebljava, jer je manje invazivna od metode „uljnog spreja“ i preporučuje se kod ostarelih izolacionih sistema kada je potrebno detaljno isprati i sušiti IS u blažim uslovima. Obično traje duže od tehnike „uljnog spreja“ i metode „U parama rastvarača“ jer se celokupna količina ulja koristi u procesu. Ova metoda je veoma efikasna u procesu ispiranja izolacije namotaja.

Kada je onemogućena primena vakuuma u transformatoru, zbog starosti-specifičnosti konstrukcije transformatorskog suda, dostupno je nekoliko metoda:

- Recirkulacija ulja sa kontinualnim sušenjem ulja, i

- Inovirana INT-NFHT (INT – Nitrogen Flow High Temperature) metoda koja se zasniva na kombinovanom korišćenju dva radna fluida: ulja i suvog azota na povišenim radnim temperaturama.

Efikasnost postupka ispiranja i sušenja čvrste izolacije je posebno značajan deo procesa u cilju postizanja dobrih dugoročnih efekata revitalizacije IS. Značajna količina produkata starenja adsorbovana je u čvrstoj izolacije i veoma je važno temeljno isprati i osušiti čvrstu izolaciju, te se nakon tog postupka može očekivati poboljšanje dielektričnih osobina (otpori izolacije, faktor dielektričnih gubitaka i indeksi polarizacije) i usporeno starenje čvrste izolacije.

Poznate su metode ispiranja tečnostima koje imaju visok afinitet za absorpciju produkata starenja iz čvrste izolacije (kerozin, visoko aromatska ulja), primena para organskih rastvarača, sopstvenog ulja i/ili regenerisanog ulja (kao u INT – NFHT postupku).

HEMIJSKA REGENERACIJA ULJA I REVITALIZACIJA ČVRSTE IZOLACIJE

Hemijska regeneracija ulja obuhvata postupke uklanjanja produkata starenja i vode iz ulja. Najčešće primenjeni postupci se zasnivaju na adsorbpciji jedinjenja koje je potrebno ukloniti iz ulja, prolaskom ulja kroz nepokretan sloj adsorbenta – perkolacioni postupak pod dejstvom vakuuma. U primeni su različiti adsorbenti i procesni uslovi: radna temperatura, brzine protoka, pritisak. Kapacitet adsorbenta za adsorbpciju hidrofilnih ili hidrofobnih komponenti iz ulja i vode zavisi pored hemijske strukture, morfologije adsorbenta i od temperature. Hemijski sastav adsorbentata je različit i promenljiv, ali se generalno mogu klasifikovati na: prirodne aluminosilikate i sintetičke aluminosilikate - „zeolite” koji se razlikuju po veličini čestica, aktivnoj površini, veličini pora, broju –Si-O-Si – veza. Odnos Al/Si određuje afinitet adsorbenta za adsorbpciju više ili manje polarnih jedinjenja iz ulja. Vreme kontakta je u korelaciji sa poroznošću adsorbenta, tj. veličinom pora, aktivnom površinom, gustinom i visinom sloja, konstrukcijom kolone i protokom uljne faze, te se ovaj parametar modifikuje prema karakteristikama primenjenog adsorbenta i tehničkim mogućnostima mašine za obradu. Optimizacija procesnih parametara: maseni udeo adsorbenta, temperatura i vreme kontakta (broj ciklusa) vrši se laboratorijskim ispitivanjima pre izvođenja postupka na terenu. Ispitivanjem karakteristika ulja prema IEC 60422, pre i nakon hemijske regeneracije u laboratoriji može se proceniti efikasnost postupka, dok budući radni vek regenerisanog ulja određuje se ispitivanjem oksidacione stabilnosti regenerisanog ulja prema metodi IEC 61125 B.

PRIMERI IZ PRAKSE

U tabeli 1. prikazani su rezultati sušenja IS blok transformatora u HE metodom „uljnog spreja“. Ispitivanje sadržaja vode u čvrstoj izolaciji metodom povratnog napona - RVM (eng. Recovery volatge meter) nakon završenog procesa su u korelaciji sa merenjem sadržaja vode u ulju i procenjenim sadržajem vode u čvrstoj izolaciji prema dijagramima ravnoteže [3,4]. U toku prvih devet meseci sadržaj vode je stabilan i nizak (korigovana vrednost na 20°C iznosi 3 ppm), te se može zaključiti da je IS predmetnog transformatora dobro osušen. Sadržaj vode u čvrstoj izolaciji prema RVM metodi iznosi 1.5%, dok prema Karl-Fisher i ravnotežnim dijagramima iznosi 1.7 %, te se može zaključiti da je korelacija RVM i Karl-Fisher metode spregnute sa ravnotežnim dijagramima je postignuta sa zadovoljavajućom preciznošću.

Tabela 1. Procenjene vrednosti sadržaja vode u celuloznoj izolaciji, na osnovu merenja sadržaja vode u ulju metodom Karl-Fisher

Oommen	Fabre-Pichon,	EHV – Weidmann	Nomogram Denver Colorado
1.8	1.8	1.7	1.5

Metoda sušenja izolacije transformatora čiji sud ne izdržava vakuum „INT – NFHT“

Tehnologija INT-NFHT je razvijena za sušenje izolacije transformatora čiji sud ne izdržava vakuum. Ograničenja metode zbog nemogućnosti primene vakuuma su pre svega u krajnim efektima sušenja čvrste izolacije i dužini trajanja procesa. Tehnologija INT – NFHT je razvijena sa ciljem da u što većoj meri

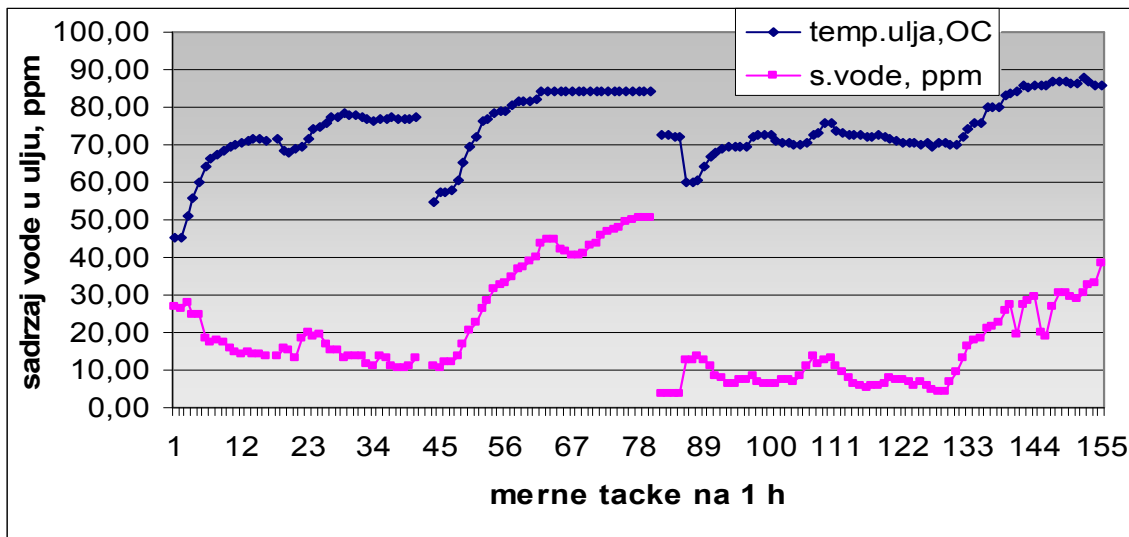
kompenzuje nemogućnost primene vakuuma, primenom visokih radnih temperatura i korišćenje Azota kao pomoćnog radnog fluida. U uslovima interizovane atmosfere procesi degradacije IS su usporeni i odvijaju se intenzivnije na temperaturama iznad 130°C. Proces se odvijao u sledećim ciklusima:

- Zagrevanje ulja cirkulacijom između mašine i trafo suda na prvu radnu temperaturu - T1 i strujanje zagrejanog suvog Azota preko površine ulja pri definisanom protoku i vremenu strujanja
- Pražnjenje ulja iz transformatora i produvanje zagrejanog azota preko namotaja odozdo na gore na temperaturi T1
- Drugi ciklus punjenja i zagrevanja ulja na drugu radnu temperaturu – T2 i strujanje Azota preko površine ulja
- punjenja i zagrevanja ulja na drugu radnu temperaturu – T2 i strujanje Azota preko površine ulja
- Pražnjenje ulja iz transformatora i produvanje zagrejanog azota preko namotaja odozdo na gore na temperaturi T2
- Treći ciklus punjenja i zagrevanja ulja na drugu radnu temperaturu – T3 i strujanje Azota preko površine ulja
- punjenja i zagrevanja ulja na drugu radnu temperaturu – T3 i strujanje Azota preko površine ulja
- Završno punjenje ulja i transformator i recirkulacija ulja između mašine i trafo suda na temperaturi T 4 od 65 - 70°C do postizanja sadržaja vode u ulju < 5 ppm.

Protok azota i vreme proticanja su optimizovani u laboratorijskim uslovima. Ispitivanje termičke stabilnosti papirno/uljne izolacije pri definisanim radnim temperaturama izvršeno je u laboratoriji merenjem sadržaja vode i stepena polimerizacije papira, kao i analiza uljnih frakcija uljnog kondenzata i karakteristike ulja u cilju definisanja maksimalno dozvoljenih radnih temperatura procesa i očuvanja papirno/uljne izolacije. Tokom procesa grejanja transformatora vrelim uljem, prenos toplote i vode iz celuloze putem dva radna fluida: ulja i Azota u okolnu atmosferu je poboljšano strujanjem Azota simultano kroz namotaje i preko površine ulja pri definisanim temperaturama $T1 < T2 < T3$, protoku i vremenu strujanja/kontakta. Ispiranje namotaja je izvedeno u tri sukcesivna postupka punjenja i pražnjenja ulja. Hemijski sastav ulja se kroz tri ciklusa hemijske regeneracije adsorbentima postepeno menjao, što je bilo veoma značajno sa aspekta sukcesivne adsorpcije polarnih produkata iz čvrste izolacije kroz cikluse.

U tabeli 4. prikazani su rezultati hemijske regeneracije ulja blok transformatora sa HE primenom perkolacionog postupka sa prirodnim adsorbentima, Sud transformatora ne izdržava vakuum i ima 46 godina pogona, te je sušenje i ispiranje čvrste izolacije izvršeno primenom „INT –NFHT“ metode.

Na slici 4. prikazani su rezultati on-line praćenja sadržaja vode u ulju tokom procesa sušenja čvrste izolacije sopstevnim regenerisanim uljem u tri ciklusa. Kroz svaki od ciklusa sadržaj vode je pratio porast temperature ulja, ali su krive sadržaja vode u ulju dostizale maksimume na nižim vrednostima kroz cikluse sušenja, iako se radna temperatura u narednim ciklusima povećavala, što ukazuje na značajne efekte sušenja čvrste izolacije i sukcesivno smanjenje zaostale količine vode u čvrstoj izolaciji.



Slika 4. promena sadržaja vode u ulju tokom tri ciklusa zagrevanja

Nakon regeneracije prirodnim adsorbentima, ulje je re-inhibirano sa 0.34% fenolnog inhibitora – DBPC i 32 ppm dodatnog inhibitora - aaminskih derivata toluol tri azola (amin TTA) u cilju poboljšanja oksidacione stabilnosti i budućeg radnog veka ulja. Regenerisano ulje zadovoljava granične vrednosti, propisane za nekorišćena ulja u novim transformatorima. Električne karakteristike ulja, tj.faktor dielektričnih gubitaka (tgδ) i specifična električna otpornost (ρ) i kiselinski broj (Nb) su unapređene u vrednosti propisane granicama IEC 60296 za nova, nekorišćena ulja (Tabela 3). Rezultati visoke vrednosti indukcijonog perioda – IP ukazuje na dug budući radni vek regenerisanog ulja.

Tabela 3. Blok transformator HE, 121/10.5 kV, 40 MVA pre i posle revitalizacije IS tehnologijom INT-NFHT

Karakteristike ulja	Pre regeneracije	Posle regeneracije	IEC 60296/60422
Kis. broj-Nb, mgKOH/g	0.14	0.008	≤ 0.03
Električni proboj, kV	70	75	/ ≥ 60 *
tgδ, ‰	23.5	2.94	5 / ≤ 15*
ρ, GΩm	9.5	109	/ ≥ 60*
σ, mN/m	23	37	40 / ≥ 35*
DBPC, ‰	< 0.04	0.34	-
Aminski TTA, ppm	/	32	-
IP, h (IEC 61125 B)	-	190	≥ 120
Čestice - ISO 4406	-	14/11	/ 15/12
Sadržaj vode, ppm	27	5	20
Sadržaj vode, ppm (nakon 7 meseci pogona)	-	12	20
Sadržaj vode, na 20°C*, ppm (nakon 8 meseci pogona)	-	8	10 (na 20°C*)

Tabela 4. Električne karakteristike ulja Blok transformator HE, 121/10.5 kV, 40 MVA pre i nakon revitalizacije IS tehnologijom INT-NFHT

Godina ispitivanja	Merna sprega	R60 (MΩ) (sv. na 20 °C)	Indeks polarizacije	tg δ % (sv. na 20°C)
2007 pre revitalizacije	VN – NN	2380	1.04	0.50
	VN – M	8190	1.02	0.43
	NN – M	1372	1.02	0.54
2007 nakon revitalizacije	VN – NN	15200	1.32	0.32
	VN – M	50500	1.44	0.34
	NN – M	7000	1.20	0.34

Sadržaj vode u ulju osam meseci nakon revitalizacije IS je zadovoljavajući, posebno ako se uzme u obzir da je tehnologija sušenja INT-NFHT primenjena u odsustvu vakuuma, koji predstavlja pored temperature ključnu pogonsku silu procesa sušenja. Električna ispitivanja pre i nakon procesa revitalizacije IS ukazuju na značajno poboljšanje svih karakteristika: otpora izolacije, faktora dielektričnih gubitaka i indeksa polarizacije, što govori o visokom stepenu revitalizacije – uklanjanja vode i produkata starenja iz čvrste izolacije (Tabela 4), što predstavlja ključne parametre za verifikaciju tehnologije INT-NFHT revitalizacije IS transformatora čiji sud ne izdržava vakuum.

Legenda:

tgδ: faktor dielektričnih gubitaka; ρ:specifična električna otpornost ulja; σ: međupovršinski napon ulje-voda
DBPC: antioksidant ulja – diterc.-butil para-krezol; Aminski TTA:aminski derivati toluol triazola

IP: indukcioni period, slika oksidacione stabilnosti ulja;

IEC 60296 zahtevi za nova, nekorišćena ulja i IEC 60422 granične vrednosti za nova ulja u novim transformatorima

Sadržaj vode na 20°C*: sadržaj vode preračunat sa radne temperature ulja na 20°C.

VN: viski napon; NN: niski napon

R 60 (MΩ): otpori izolacije

ZAKLJUČAK

Revitalizacija izolacionog sistema transformatora može se efikasno primeniti procesima sušenja i regeneracije ulja, ispiranja i sušenja čvrste izolacije, ukoliko se primene na vreme i u skladu sa procenjenim stanjem IS na osnovu analize uvida u pogonsko stanje transformatora. Postupci revitalizacije IS značajno utiču na efektivno produženje životnog veka transformatora koji je praktično određen životnim vekom čvrste izolacije. Ispitivanje sadržaja vode u čvrstoj izolaciji metodom „RVM“ je u korelaciji sa metodom ispitivanja sadržaja vode u ulju spregnutom sa dijagramima ravnotežne raspodele u IS, što je potvrđeno komparativnim merenjima na transformatoru u HE čiji je IS osušen tehnikom „uljnog spreja“ u vakuumu.

Revitalizacija IS i produženje životnog veka blok transformatora u HE nakon 46 godina rada je uspešno izvršena primenom INT-NFHT tehnologije uz primenu on-line i on-site kontrole procesa sušenja i filtriranja ulja. Karakteristike ulja i pogonsko stanje čvrste izolacije su u velikoj meri poboljšane, na osnovu rezultata ispitivanja ulja i električnih merenja. Ulje se nalazi u klasi kvaliteta novih ulja, dok otpori izolacije, faktor dielektričnih gubitaka, indeksi polarizacije i relativno nizak sadržaj vode u ulju ukazuju na visok stepen revitalizacije čvrste izolacije. Pogonsko stanje IS nakon izvršenog postupka se nalazi u klasi kvaliteta novih transformatora u okviru graničnih vrednosti propisanih IEC 60422 standardom.

LITERATURA:

- (1) I. Hohlein, A.J.Kachler, Progress In Transformer Ageing Research. Impact Of Moisture On DP Of Solid Insulation And Furan Development In Oil At Transformer Service Temperatures, D1-309 CIGRE Session 2004.
- (2) M.Koch, et.al. Advanced Online Moisture Measurements in Power Transformers, CMD international Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Korea, April 2006
- (3) C.Krause, et.al., Effects of Moisture in Transformerboard insulation and the Mechanism of Oil Impregnation of Voids, Weidmann- ACTI Inc., Transform 98.
- (4) FIST 3-30 Transformer Maintenance, USS Department of the Interior Reclamation Bureau, Denver, Colorado, October 2000.
- (5) T.K.Saha, P.Purkait, Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil-Paper Insulation of Aged Transformers, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol.11, No 1, February 2004.
- (6) B.V.Vanin, Oil-impregnated Cellulosic Insulation. Moisture diffusion and Equilibrium in View of Interfacial Adsorption Water Vapor by Cellulose in Insulation Microcapillaries, CIGRE Session, Paris, 2000.
- (7) M.K.Pradhan, Diagnostic Testing of oil-impregnated Paper Insulation in Pro-rated Power Transformers under Accelerated Stress, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, 19-22 September 2004.
- (8) J.Lukić, et.al., Proceedings, Analysis and Optimization of 150 MVA, 220 kV Transmission Transformer Dry Out Process, SC A2, JUKO CIGRE, 30.09.-5.10.2007.

Abstract: In this paper diagnostics approach and condition based assessment of power transformers is described together with mitigation techniques for revitalization of paper/oil insulation system. Condition based assessment derived from oil analysis is based on several important data: transformer design, years of service, history of filed events and measurements data, position and importance of transformer in the system. Several techniques for paper/oil insulation are described in this paper together with basic thermodynamic principles for removing water out from solid insulation.

Results of on-site dry-out of insulation using “hot oil spray” are shown with results of correlation between measurement of water in the insulation system using Karl-Fisher with equilibrium charts and RVM method. Reclamation technology, INT-NFHT for transformers that can not with stand vacuum was developed based on results of laboratory simulation of process parameters: temperature, flow and residence time. INT-NFHT technology performed on-site on GSU transformer in Hydro power plant showed high efficiency based on results of chemical and electrical measurements before and after applied revitalization technology.

Key words: paper/oil insulation, revitalization, oil reclaiming and reconditioning

