

VODA U IZOLACIONOM SISTEMU ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Branka Bošković, Slađana Teslić, Jelena Lukić
Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla”, Beograd

Kratak sadržaj: Tokom životnog veka transformatora, problem koji se uvek javlja, bez obzira na veličinu i značaj transformatora, jeste problem prisustva vode u izolacionom sistemu. Voda, kao polarni molekul, negativno utiče na izolacione sposobnosti materijala, tako da povećanje sadržaja (koncentracije) vode utiče na pogoršanje električnih i mehaničkih karakteristika izolacionog sistema (IS) transformatora kao što su otpornost (specifični otpor), dielektrična čvrstoća, faktor dielektričnih gubitaka ($\tan \delta$), stepen polimerizacije papira (D_p). Zato je znanje o koncentraciji vode u transformatoru veoma važno kako bi se obezbedio siguran rad transformatora. Postupci revitalizacije izolacionog sistema, kojima se smanjuje količina vode prisutne u IS transformatora, tokom eksploatacije primenjeni u pravo vreme od velikog su značaja u usporavanju nepovratnog procesa degradacije čvrste izolacije i produžetka životnog veka transformatora. U radu će biti opisan problem vode u energetskim transformatorima i načini ispitivanja sadržaja vode u izolacionom sistemu transformatora, u ulju i u čvrstoj izolaciji.

Ključne reči: voda, ravnoteža, temperatura, stepen zasićenja, izolacioni sistem, čvrsta izolacija, transformator, ravnotežni dijagrami.

1. POREKLO VODE U TRANSFORMATORU

Odakle potiče voda u transformatoru? Brojni su načini na koji voda može dospeti u transformator. Prilikom isporuke transformatora iz fabrike čvrsta izolacija može biti ovlažena ukoliko se proizvođač ne pridržava standarda propisanih za proizvodnju i isporuku transformatora. Takođe, prilikom otvaranja transformatora radi inspekcije i popravke, u fabrici ili na terenu, čvrsta izolacija može apsorbovati vlagu iz atmosfere. Zatim, na mestima curenja ulja može doći do ulaska i vode i atmosfere vlage u sistem. Zato je važno pravovremeno reagovati u slučaju otkrivanja curenja ulja, najpre zbog stvaranja potencijalnog mesta za ulazak vode u transformator. Slično se događa i ukoliko transformator nije u pogonu. Brzo hlađenje transformatora, podpomognuto kišom ili snegom, uzrokuje pad pritiska u transformatoru i brzi ulazak vlage iz atmosfere (za nekoliko sati). Slabe tačke energetskih transformatora po pitanju vlage su provodni izolatori i sigurnosni ventil nadpritiska. Kada je transformator u pogonu, voda migrira u najhladnije delove transformatora i na mesta najvećeg električnog napreznja (polja). Tako će više vode biti na dnu transformatora zbog niže temperature u tom delu za 10-20°C u odnosu na gornje delove transformatora. Najviše starih transformatora doživljava havarije baš u donjoj trećini namotaja, gde je oblast sa najviše vode [9]. I na kraju, najveći izvor vode u transformatoru je voda koja nastaje kao produkt degradacije celulozne izolacije transformatora. Pri tome nastajanje te vode dalje ubrzava proces degradacije celuloze, potpomognute dejstvom temperature i kiseonika (autokatalizovana reakcija). Ta tri mehanizma degradacije čvrste izolacije: hidroliza (pod uticajem vode), piroliza (pod uticajem temperature) i oksidacija (pod uticajem kiseonika) deluju

simultano. Voda i kiseonik uzrokuju i brže stvaranje kiselina i taloga iz ulja, kao produkata starenja ulja. Talog se, zatim, gomila na namotajima unutar strukture transformatora i čini hlađenje manje efikasnim pa dolazi do povećanja temperature ulja i povećanja brzine stvaranja vode i kiselih produkata starenja. Prisustvo veće količine kiseonika u izolacionom sistemu u znatnoj meri utiče na inteziviranje procesa degradacije ulja, jer se kiseonik veoma dobro rastvara u ulju. Rastvorljivost kiseonika u celuloznom makromolekulu je manja u odnosu na ulje i stepen degradacije celuloze pod uticajem kiseonika je manji od uticaja kiseonika na degradaciju ulja. Međutim, produkti nastali degradacijom ulja, posebno kiseline, apsorbuju se u čvrstoj izolaciji i time deluju, zajedno sa temperaturom, kao promoteri degradacije čvrste izolacije. Oni predstavljaju tzv. aktivatore kisele hidrolize celulozne izolacije. Dalje, pošto papirna izolacija ima veći afinitet ka vodi od ulja, voda će se nejednako distribuirati u IS transformatora tako što će više vode biti u papiru nego u ulju (papir je tzv. depo vode u transformatoru). Smatra se da se preko 90% ukupne vode u transformatoru nalazi u čvrstoj izolaciji [2]. Na primer, 150 MVA / 400 kV transformator, koji ima oko 7 t papira i 80 t ulja, sa 20 ppm vode u ulju, ima 2 kg vode u ulju i oko 223 kg vode u papiru.

2. UTICAJ TEMPERATURE NA RAVNOTEŽU VODE

U ravnoteži vode u sistemu ulje/ papir, temperatura je veoma važan faktor prilikom uspostavljanja raspodele. U tabeli 1. je prikazana raspodela vode u ulju i papiru u odnosu na temperaturu [9].

Tabela 1. Raspodela vode u ulju i papiru u zavisnosti od temperature

T, °C	voda u ulju	voda u papiru
20°C	1	3.000 puta više nego u ulju
40°C	1	1.000 puta više nego u ulju
60°C	1	300 puta više nego u ulju

Zato je veoma važno znati temperaturu ulja na mestu sa kog se uzorkuje ulje jer je sadržaj vode u ulju samo mali deo ukupne vode koja postoji u transformatoru. Količina vode koja može biti rastvorena u ulju raste sa temperaturom tj. što je veća temperatura voda se bolje rastvara u ulju. Transformator koji na 20°C ima 20 ppm vode u ulju je vlažniji od transformatora koji na 40°C ima 20 ppm vode.

IEC standard 60422 - "Uputstvo za održavanje i nadzor mineralnih izolacionih ulja u elektrotehničkoj opremi", daje granične vrednosti sadržaja vode u ulju korigovane na temperaturu 20°C i opšte preporuke za tumačenje sadržaja vode u ulju i izolaciji (tabela 2). U toku je izrada najnovijeg, revidiranog IEC standarda 60422, nakon čijeg će skorog usvajanja granične vrednosti sadržaja vode u ulju biti date na radnoj temperaturi transformatora (tabela 3).

Tabela 2. Granične vrednosti sadržaja vode korigovane na temperaturu 20°C, po naponskim nivoima transformatora i ocenama stanja, IEC 60422

Kategorija	Naponski nivo transformatora, kV	A	B	C
Sadržaj vode (mg _{H2O} /kg _{ulja} na 20°C) - korigovano na ekvivalentnu vrednost na 20°C	≥400, 400-170	<5	5-10	>10
	72,5-170, merni	<5	5-15	>15
	≤72,5	<10	10-25	>25

Tabela 3. Granične vrednosti sadržaja vode na radnoj temperaturi transformatora, po naponskim nivoima transformatora i ocenama stanja, IEC 60422

Kategorija	Naponski nivo transformatora, kV	A	B	C
Sadržaj vode (mg _{H2O} /kg _{ulja}) na radnoj temperaturi transformatora	≥400, 400-170	<15	15-20	>20
	72,5-170, merni	<20	20-30	>30
	≤72,5	<30	30-40	>40

U dugogodišnjoj praksi Laboratorije za ispitivanje izolacionih ulja Elektrotehničkog Instituta „Nikola Tesla“, pokazalo se da se rezultati ispitivanja sadržaja vode u ulju i u papiru odlično poklapaju sa rezultatima drugih laboratorija. To je i potvrđeno u međulaboratorijskom Round Robin testu (RRT) iz 2009. godine radne grupe IEC/TC 10 – MT 24 „Determination of water content in natural esters and synthetic esters by coulometric Karl Fischer titration“ i „Determination of the water content of virgin and oil impregnated paper and pressboard“, u kojima je pored naše laboratorije učestvovalo oko 20 vodećih laboratorija iz Evrope, Amerike, Japana. Predstavnik Laboratorije za ispitivanje izolacionih ulja učestvuje i u reviziji IEC standarda 60422.

Prilikom tumačenja rezultata ispitivanja sadržaja vode u ulju, u praksi, uzima se apsolutna izmerena vrednost na datoj temperaturi ulja (u ppm), dok se za radne temperature preko 35°C može primeniti temperaturna korekcija - svodenje na temperaturu od 20°C (temperaturnu korekciju ne treba primenjivati za radne temperature ulja manje od 35°C). Korekcija sadržaja vode na datoj temperaturi na vrednost sadržaja vode na 20°C se izvodi na sledeći način:

Sadržaj vode na 20°C = f (korekcionni faktor za temperaturu) • sadržaj vode na temperaturi uzorkovanja,

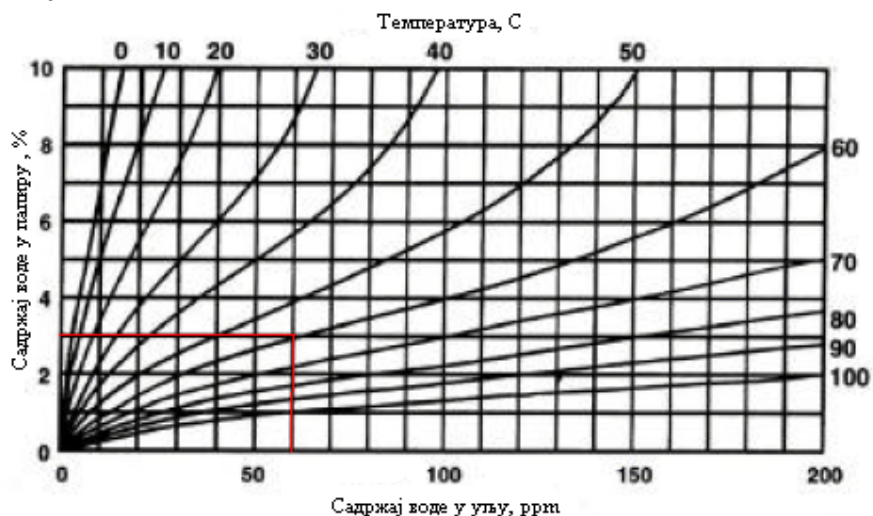
gde je korekcionni faktor:

$$f = 2,24e^{(-0,04t_s)} \quad (1)$$

a t_r radna temperatura ulja prilikom uzorkovanja. Kada postoje značajne promene u režimu rada transformatora, pri čemu dolazi do promene temperature, korisno je primeniti temperaturnu korekciju i videti da li se zaista povećava sadržaj vode u ulju ili samo fluktira sa temperaturom. Sa povećanjem temperature, pored povećanja brzine difuzije molekula vode, povećava se i sposobnost ulja za rastvaranje vode, pa se samim tim povećava i nivo zasićenja izolacionog ulja vodom. Ali ukoliko količina vode pređe stepen zasićenja, tada ne može biti rastvorena u ulju pa se izdvaja kao slobodna voda. Ovakvo stanje drastično snižava dielektričnu čvrstoću izolacionog ulja (probajni napon ulja).

3. RAVNOTEŽNI DIJAGRAMI

U literaturi se mogu naći različiti dijagrami preko kojih se može, iz izmerenog sadržaja vode u ulju, preračunavanjem doći do sadržaja vode u čvrstoj izolaciji i obrnuto. Jedan od takvih je *Oommen* dijagram (slika 1). Ovakav pristup se sastoji od tri koraka: uzorkovanje ulja u radnim uslovima transformatora, merenje sadržaja vode u ulju Karl-Fišer kulometrijskom titracijom, preračunavanje izmerenog sadržaja vode u ulju preko ravnotežnog dijagrama. Ova procedura, međutim, ima slabe tačke. Prvo, problemi vezani za određivanje koncentracije vode - pravilno uzorkovanje (istakanje dovoljne količine ulja pre uzorkovanja, higijena, vremenski uslovi...), transport do laboratorije i samo merenje, jer različite laboratorije koriste različite reagensne prilikom titracije.

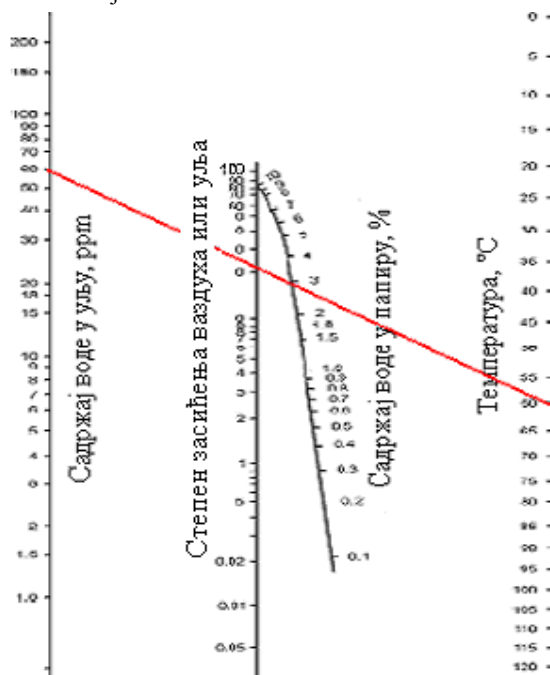


Slika 1. *Oommen* dijagram (1983)

Drugi nedostatak je taj što autori dijagrama, kao što su *Oommen*, *Fabre-Pichon*, *Griffin*, uzimaju aproksimaciju da su postignuti uslovi ravnoteže između raspodele vode u ulju i u papiru i da je dostignuto ravnotežno stanje, što je u praksi teško ostvarivo. Stanje ravnoteže bi bilo postignuto ukoliko bi temperatura u transformatoru bila konstantna i uniformna duži vremenski period, ukoliko vlažan vazduh ne bi dospevao u transformator i kada ne bi bilo učestanih promena u temperaturi između ulja i papira. Pošto su u našoj zemlji uglavnom zastupljeni transformatori sa vazдушnim disanjem, a promena temperature ulja i papira uvek prisutna zbog načina rada transformatora,

ravnotežni uslovi u transformatoru su teško dostižni. Treće, postoji nesigurna oblast dijagrama i nalazi se u oblasti niskih koncentracija vode u ulju (suva izolacija i niske temperature). Dalje, sadržaj vode u čvrstoj izolaciji dobijen preračunavanjem iz sadržaja vode u ulju daje srednju vrednost za celu čvrstu izolaciju u kontaktu sa uljem (kao da je raspodela vode homogena, što u stvarnosti nije slučaj), dok električne metode mogu da lokalizuju vlažne oblasti u čvrstoj izolaciji. Pošto je odnos između sadržaja vode u papiru (izražen u %) i vode u ulju (izražen u ppm) temperaturno zavistan, rezultati preračunavanja sadržaja vode u papiru se dobijaju posredno i nose određeni stepen nesigurnosti.

Još jedan od često korišćenih dijagrama u praksi je nomogram objavljen još 1974. u *General Electric*. Ukoliko je poznata temperatura ulja i sadržaj vode u ulju (u ppm), može se odrediti sadržaj vode u papiru (u %) i stepen zasićenja ulja vodom (u %), koji predstavlja rastvorenu količinu vode u odnosu na maksimalno moguću količinu vode koja se može rastvoriti u ulju.

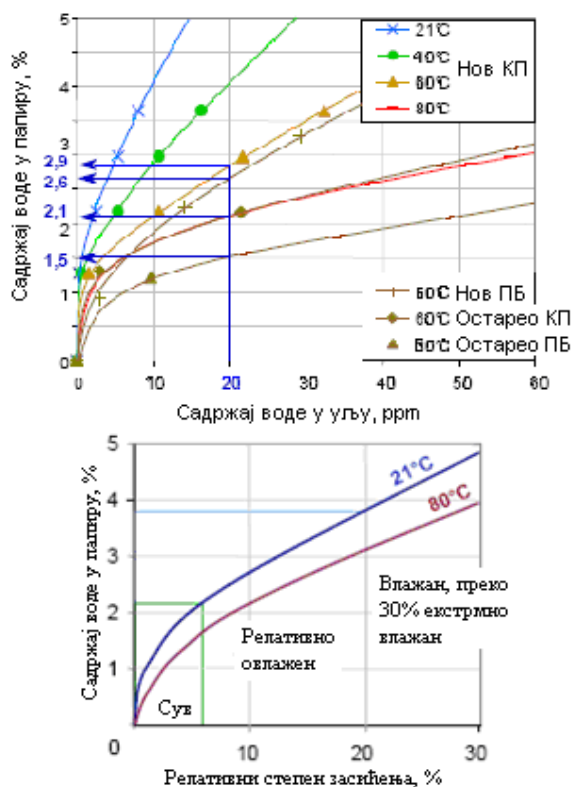


Slika 2. Nomogram – sadržaj vode u ulju i papiru

U praksi se pokazalo da se *Oommen* dijagram i nomogram slažu u proceni sadržaja vode u čvrstoj izolaciji. Ukoliko je, na primer, sadržaj vode u ulju 60 ppm, a temperatura ulja 60°C, preko ova dva dijagrama dolazimo do sadržaja vode u papiru od oko 3% (slika 1 i 2).

Da bi se izbegle „slabe tačke“ *Oommen* dijagrama i nomograma, mogu se koristiti *M. Koch* ravnotežni dijagrami koji uzimaju u obzir ostarelost ulja i čvrste izolacije (Kraft-papira i Pres-borda). Pošto ostarelo ulje i papir imaju različit kapacitet apsorpcije vode u odnosu na nove, na slici 3. levo, date su ravnotežne krive za ostareo Kraft-papir i Pres-bord. Za isti sadržaj vode u ravnotežnom sistemu ulje-papir (npr. 20 ppm), sadržaj vode je niži za ostarele nego za nove sisteme na istoj temperaturi (1,5% za ostarelo ulje i

Pres-bord, 2,1% za ostarelo ulje i Kraft-papir, 2,6% za nov Pres-bord i 2,9% za nov Kraft-papir). Razlog tome je to što su produkti starenja izolacije, kao što su alkoholi, ketoni, aldehidi, kiseline, po prirodi polarna jedinjenja i kao takva vezuju polarni molekul vode vodoničnim i *Van Der Waals* vezama i tako povećavaju sposobnost ulja da rastvori vodu.



Slika 3. Ravnotežni dijagram raspodele vode u ulju i Kraft-papiru (KP), i u novom Pres-bordu (PB) i ostareлом KP i PB (gore) za različite temperature; Ravnotežni dijagram relativnog stepena zasićenja vode u odnosu na sadržaj vode u papiru za različite temperature, sa graničnim vrednostima prema IEC 60422 (dole)

Još jedan korak ka poboljšanju preračunavanja sadržaja vode jeste direktno merenje sadržaja vode u ulju (on-line) i upotreba ravnotežnih dijagrama relativnog stepena zasićenja ulja vodom (%) umesto apsolutnog sadržaja vode (ppm), slika 3. dole. Prednost korišćenja ovakvih dijagrama je što uticaj starenja izolacije na rastvaranje vode u ulju postaje minoran jer je taj uticaj već uračunat u relativni stepen zasićenja ulja. Dalje, kapacitet apsorpcije vode je manje temperaturno zavistan (slika 3, desno), a merenje sadržaja vode on-line sensorima isključuje greške pri transportu i titraciji uzoraka u laboratoriji.

Apsolutni sadržaj vode u ulju (ppm) je direktno proporcionalan relativnom stepenu zasićenja (RS, %):

$$RS, \% = w / w_s \cdot 100 \quad (2)$$

gde je w – apsolutni sadržaj vode u ulju (ppm), w_s stepen zasićenja ulja vodom. Temperatura zavisnost stepena zasićenja ulja, u novim uljima, predstavljena je jednačinom:

$$\log w_s = 7,0895 - \frac{1567}{T} \quad (3)$$

gde je T – temperatura ulja na mestu uzorkovanja (K), a za ostarela ulja

$$w_s = e^{[A-B/T+C \cdot C_A+D \cdot Nb]} \quad (4)$$

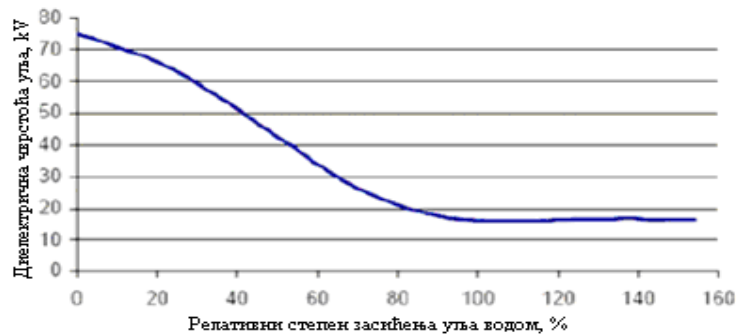
gde su A, B, C i D - konstante, C_A i Nb – sadržaj aromata i kiselina u ulju. Kriterijumi ovlaženosti čvrste izolacije, prema standardu IEC 60422, u odnosu na relativni stepen zasićenja ulja vodom dati su u tabeli 4.

Tabela 4. Kriterijumi ovlaženosti čvrste izolacije

Relativni stepen zasićenja vode u ulju	Stanje čvrste izolacije
0 % – 5 %	Suva izolacija
6 % – 20 %	Relativno vlažna izolacija
21 % – 30 %	Vlažna izolacija
> 30 %	Veoma vlažna izolacija

4. UTICAJ VODE NA DIELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE IZOLACIONOG SISTEMA

Visok sadržaj vode u izolacionom sistemu transformatora smanjuje dielektrične karakteristike sistema. Sadržaj vode u papiru od npr. 4-5 %, umanjuje dielektričnu čvrstoću za 20-30 % (sa 300 kV/cm na 210 kV/cm), dok visok sadržaj vode u ulju deluje još drastičnije. Poslednje studije pokazuju da dielektrična čvrstoća ulja zavisi od relativnog stepena zasićenja ulja vodom, a ne od apsolutnog sadržaja vode u ulju, jer različita ulja imaju različit kapacitet da rastvaraju vodu (jednačina 4). Negativni efekti rastvorene vode u ulju se javljaju pri porastu relativnog stepena zasićenja, pri čemu se povećava konduktivnost (provodljivost) čestica koje apsorbuju vodu, tako da zajedno dovode do snižavanja dielektrične čvrstoće ulja (slika 4). Visok stepen zasićenja ulja vodom, u kombinaciji sa prisutnim česticama i povišenim sadržajem kiselina u ulju, jesu faktori koji utiču na smanjenje dielektričnih karakteristika.



Slika 4. Dijagram zavisnosti dielektrične čvrstoće ulja od relativnog stepena zasićenja ulja vodom

Uticaj rastvorene vode (visok RS) i čestica u ulju je izražen kod transformatora koji su van pogona, jer rastvorljivost vode u ulju eksponencijalno pada sa snižavanjem temperature pa može doći do izdvajanja slobodne vode. Zato se veliki broj havarija dešava nakon puštanja vlažnih transformatora u pogon, naročito u zimskom periodu, ili pri naglom hlađenju transformatora.

5. PRIMER IZ PRAKSE

Rezultati kompleksne dijagnostike energetskog transformatora na hidroelektrani (121/6,3 kV, 17 MVA, u pogonu od 1975. godine) dobar su primer sprege između visokog sadržaja vode u ulju i pada dielektričnih karakteristika ulja, kao i rezultata ispitivanja sadržaja vode hemijskim i električnim metodama. Kao što se vidi iz tabele 5, sadržaj vode u ulju uzorka od 10.08.2009. iznosi 72 ppm, a vrednost sadržaja vode korigovana na 20°C je 13,5 ppm. Obe vrednosti su visoke za dati naponski nivo i u porastu u odnosu na prethodno izmerene vrednosti. Izmerna dielektrična čvrstoća je snižena (138 kV/cm) i ispod granične vrednosti za dati naponski nivo. Sadržaj 2-FAL (derivat furana) je izuzetno visok i u porastu, pri čemu su prisutni i drugi derivati furana koji ukazuju na prisustvo aktivnog procesa degradacije celuloze. Visok sadržaj vode, pad dielektrične čvrstoće ulja, visok sadržaj derivata furana u ulju, najverovatnije su posledica intenzivne degradacije čvrste izolacije, generisanja celuloznih vlakana i ovlaženosti izolacionog sistema. U ovom slučaju, visok sadržaj vode je posledica visokog stepena ostarelosti čvrste izolacije transformatora i ima negativan uticaj na brzinu starenja izolacionog sistema transformatora i dalje ubrzava proces starenja.

Tabela 5. Rezultati hemijskih ispitivanja ulja transformatora

Datum uzorkovanja	29/07/2008	10/08/2009
T ulja, °C	45	62
Sadržaj vode u ulju, ppm	27	72
Sadržaj vode korigovan na 20°C, ppm	10,0	13,5
Dielektrična čvrstoća ulja, kV/cm	/	138
2-FAL, ppm	11,1	13,4

Procenjeni sadržaj vode u čvrstoj izolaciji, koji je posredno dobijen preko ravnotežnih dijagrama, je oko 3% i u dobroj meri se poklapa sa vrednošću od 3,1%,

dobijenom metodom merenja povratnog napona (RVM). Ispitivanjem električnom metodom RVM (Recovery Voltage Measurement) vrši se procena sadržaja vode u papiru na osnovu merenja povratnog napona. Rezultati ispitivanja, međutim, mogu biti nešto većih vrednosti jer se ovom metodom mere svi polarni produkti, uključujući i vodu, u čvrstoj izolaciji.

Tabela 6. Iz izveštaja Instituta br. 409507/1-L– Merenje povratnog napona sa procenom sadržaja vlage u čvrstom delu uljno-papirne izolacije energetskog transformatora metodom **RVM-Recovery Voltage Measurement**

tc (s)	U _{rmax} (V)	H ₂ O (%)	T _{critical} (°C)
11.84	187.7	3.1	67

Transformator je predmet kompleksne dijagnostike, koja obuhvata dalja fizičko-hemijska ispitivanja uzoraka ulja i papirne izolacije i električna merenja transformatora na terenu.

6. ZAKLJUČAK

Procena ovlaženosti transformatora i donošenje odluke o sušenju transformatora treba da budu zasnovane na kompleksnoj dijagnostici transformatora koja uključuje uporedna hemijska i električna ispitivanja (npr. otpori izolacije, tg delta, polarizacioni indeksi, RVM - Recovery Voltage Method, ispitivanje sadržaja vode u ulju Karl-Fišer titracijom), kao i na drugim dijagnostičkim analizama [1]. Svaka od ovih metoda ima prednosti i nedostatke pa je neophodno ispitivati IS preko više metoda i rezultate posmatrati integralno. Potrebno je i precizno obeležiti radne temperature ulja sa mesta gde se uzimaju uzorci, jer količina vode, kao što smo videli, varira od temperature. Da bi se adekvatno tumačila i pratila ovlaženost izolacionog sistema energetskog transformatora treba se, što je više moguće, pridržavati opštih preporuka za analizu i tumačenje sadržaja vode u ulju i izolaciji:

- meriti sadržaj vode u ulju u toku najdužeg perioda najvećeg opterećenja transformatora, kada se može usvojiti da je temperatura u transformatoru duži period približno konstantna, jer se tako stiče uvid u realnu sliku pogonskog stanja izolacionog sistema po pitanju ovlaženosti,
- uzimati što preciznije podatke o temperaturi prilikom uzorkovanja,
- prilikom analize promene ovlaženosti izolacionog sistema uzimati u obzir i apsolutni iznos koncentracije vode u ulju i vršiti temperaturnu korekciju i porediti korigovane vrednosti sadržaja vode u slučajevima kada je temperatura $\geq 35^{\circ}\text{C}$,
- u definisanju stanja prema graničnim vrednostima posmatrati obe granične vrednosti, apsolutni i korigovani iznos sadržaja vode, prema IEC 60422,
- izračunati sadržaj vode u čvrstoj izolaciji preko ravnotežnih dijagrama (koristeći nekoliko dijagrama uz poređenje rezultata, *Oommen*, *Fabre-Pichon*, *Griffin*, nomogrami) u slučajevima kada je radna temperatura ulja $\geq 40^{\circ}\text{C}$ i te vrednosti uzeti kao okvirne
- kada je god to moguće, uporediti dobijene vrednosti sadržaja vode u čvrstoj izolaciji sa rezultatima dobijenim merenjem povratnog napona.

LITERATURA

- [1] J. Lukić, S. Teslić, Đ. Jovanović, S. Milosavljević, D. Kovačević, „Analize izolacionih ulja i papira primenjene u dijagnostici pogonskog stanja energetskih transformatora“, *Elektroprivreda*, br. 3, 2008.
- [2] O. Raizman, V. Davydov, J. Duharm, „Water-in-papir activity: A new concept for moisture assesment in transformers“, *IEEE/PES Transformers Commitee Meeting*, Montreal, Quebec, Canada, october 23, 2006.
- [3] M. Koch, M. Krüger, S. Teubohlen, „Compering various moisture dermenation methods for power transformers“, *CIGRE 2009, 6th Southern Africa Regional Conference*
- [4] S. Muthukaruppan, THB transmision, „Transformer condition monitoring“
- [5] V. G. Davydov, O. Raizman, „Moisture assessment in power transformer – lessons learned“, *Vaisala news*, 160/2002.
- [6] J. Gielniah, A. Graczkowski, H. Moranda, „Evaluation of moisture content in oil-papir insulaton of test transformers using dielectric response methods and physico-chemical analysis“, *XIV International symposium of high voltage engeenering*, Tsinghua University, Beijing, China, august 2005.
- [7] Y. Du, M. Zahn, B. C. Lesieutre. A. V. Mawishev, „Moisture equilibrium in transformer papir-oil system“, *IEEE Electrical insulation magazine*, vol. 15, no. 1, 1999.
- [8] M. Koch, „Improved determination of moisture in oil-papir-insulations by specialised moisture equilibrium curves“ *Proceedings of the XIVth International symposium of high voltage engeenering*, s. 508, Beijing, China, 2005.
- [9] FIST 3-30, „Transformer maintenance-facilities instructions, standards and techniques“, october 2000.
- [10] CEI/IEC 60422:2005 - „Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance“
- [11] J. Lukić, „Koncept dijagnostike prema stanju ispitivanjem izolacionih ulja“, Seminar Elektrotehničkog Instituta „Nikola Tesla“ – „Povećanje pouzdanosti i produženje životnog veka transformatora“, mart 2009, Beograd, Srbija
- [12] T. V. Oommen, „Moisture Equilibrium Curves – Use and Misuse“

Abstract: During the transformer lifetime, existing problem in service regardless of the size and importance of the transformer, is the presence of water in the insulation system. Water as a polar molecule, negatively affects on insulating ability of material. Increase content (concentration) of water affects on the deterioration of electrical and mechanical characteristics of insulation system (IS) of transformers, such as resistance (specific resistance), dielectric strength, dielectric loss factor ($\tan \delta$), the degree of paper polymerization (DP). Therefore, knowledge about water content in the transformer is very important to ensure the safe operation of the transformer. The procedures of revitalizing the insulation system, which includes reduction of water content in IS of the transformers in service are of great importance to slow down irreversible process of

solid insulation degradation and contribute to extension of life of transformers. This paper describes phenomenon of water in the power transformers, sources, distribution and determination of water content in transformer oil and solid insulation.

Key words: *water, equilibrium, temperature, degree of saturation, insulation system, solid insulation, transformer, equilibrium diagrams.*

WATER IN INSULATING SYSTEM OF POWER TRANSFORMERS

Branka Boskovic, Sladjana Teslic, Jelena Lukic
Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla", Belgrade