

ISKUSTVA U PRIMENI NOVIH ISPITNIH METODA PRI DIJAGNOSTICI STANJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA 110/x kV U DISTRIBUTIVNOM SISTEMU**EXPERIENCE IN APPLICATION OF NEW TEST METHODS IN DIAGNOSTICS OF 110/x kV POWER TRANSFORMERS IN THE DISTRIBUTION SYSTEM**

Branko PEJOVIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija
Denis ILIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija
Valentina VASOVIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija
Jelena JANKOVIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija
Jelena LUKIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija
Vladimir OSTRACANIN, Elektro distribucija Srbije d.o.o. Beograd, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Dijagnostika stanja energetskih transformatora (ET) u dosadašnjoj praksi redovne preventivne kontrole obuhvata primenu seta postojećih električnih i hemijskih ispitnih metoda, pomoću kojih se u dobroj meri može utvrditi stanje pojedinačnih glavnih komponenti a time i sveukupna pogonska spremnost ET. Pri tome, postojeće ispitne metode po svojoj prirodi ne mogu u potpunosti da obuhvate pojedine komponente ET pa se u cilju proširenja dijagnostičkog kapaciteta i poboljšanja procene stanja i rizika eksploatacije ET pojavljuje potreba za primenom novih ispitnih metoda. U tom smislu, razvijene su relativno nove električne metode koje omogućavaju uvid u stanje prekidačkog dela i mehaničkog sklopa teretne regulacione preklopke, merenjem dinamičkih otpornosti namotaja (eng. Dynamic Resistance Measurement - DRM) i određivanje sadržaja vlage u čvrstom delu (papiru) uljno-papirnog izolacionog sistema, dielektričnom spektroskopijom u frekventnom domenu (eng. Frequency Domain Spectroscopy - FDS). Uvođenje novih hemijskih metoda ispitivanja izolacionih ulja obuhvata s jedne strane unapređenje procene stanja čvrste izolacije analizom sadržaja metanola kao specifičnog markera rane faze degradacije čvrste izolacije i poboljšanu procenu sadržaja vlage u čvrstoj izolaciji ET u radu, na bazi sadržaja vode u ulju i ravnotežnih dijagrama raspodele vode u papirno-uljnoj izolaciji. Sa druge strane, uvođenjem novih metoda i za ispitivanje korozivnog sumpora u ulju, vrši se pouzdanija dijagnostika i uvid u korozivni potencijal ulja i vrstu prisutnih korozivnih jedinjenja sumpora, pri čemu je u ovom radu poseban akcenat stavljen na test korozije srebrne pločice i kvantifikaciju korozivnih sumpornih jedinjenja, koji je od velike važnosti za procenu stanja teretnih regulacionih preklopki koje imaju posrebrene kontakte biračkog dela smeštene u sudu aktivnog dela transformatora.

U radu su prikazana iskustva u primeni novih metoda na reprezentativnom broju ET napona 110/x kV u distributivnom sistemu, dat je pregled rezultata ispitivanja i ocena stanja, kao i preporuke za dalju primenu navedenih ispitnih metoda u dijagnostici stanja ET i primenu potrebnih korektivnih mera.

Ključne reči: Energetski transformatori, DRM i FDS, procena stanja čvrste izolacije, metanol, korozivnost ulja.

ABSTRACT

Condition diagnostics of Power Transformers (PT) in the current practice of preventive routine control involves the application of a set of existing electrical and chemical test methods, which then can be used to determine to a good extent the condition of individual major components and thus the overall operational readiness of PT. However, existing test methods cannot, by their nature, fully cover the individual components of PT, so in order to expand the diagnostic capacity and improve the assessments of PT condition and exploitation risks, there is a need to apply new test methods. In this regard, relatively new electrical methods have been developed to provide insight into the condition of the diverter part and mechanical assembly of the On Load Tap Changer, by the method of Dynamic Resistance Measurement (DRM) and to determine the moisture content in the solid part (paper) of the insulation system, by method of Frequency Domain Spectroscopy (FDS). The introduction of new chemical methods for insulating oils testing involves, on the one hand, the improvement in the solid insulation state assessment, by analyzing the methanol content as a specific marker of the early phase of solid insulation degradation and improved moisture content estimation in the solid insulation of PT in operation, based on the water content in oil using equilibrium diagrams for water distribution in paper-oil insulation. On the other hand, with the introduction of new methods for testing of corrosive sulfur in oil, more reliable diagnostics and insight

into the corrosive potential of the oil and the type of corrosive sulfur compounds are made, with special emphasis in this paper on silver plate corrosion test and quantification of corrosive sulfur compounds, which is of great importance for condition evaluation of the On Load Tap Changers with selector's silver plated contacts located inside the transformer's active part tank.

The paper presents the experience in the application of new methods on a representative number of PT voltage level of 110/x kV in the distribution system, an overview of test results and condition evaluation is given, as well as recommendations for further application of mentioned test methods in the diagnostics of PT and for implementation of the necessary corrective measures.

Keywords: Power Transformers, DRM and FDS, Solid Insulation State Estimation, Methanol, Oil Corrosion.

Kontakt informacije – branko.pejovic@ieent.org

UVOD

Ispitivanja energetske transformatora 110/x kV u distributivnom sistemu konvencionalnim ispitnim metodama [1] su u višegodišnjoj praksi redovne preventivne kontrole predviđena na svake četiri godine pogona za električna ispitivanja [2], odnosno jedne, dve i četiri godine za hemijska ispitivanja uzoraka ulja, zavisno od vrste ispitivanja [3]. Ona u dobroj meri omogućavaju sagledavanje stanja glavnih komponenti ET: uljno-papirne izolacije, namotaja, magnetnog kola, prolaznih izolatora i teretne regulacione preklopke (TRP), što zajedno sa termovizijskim i vizuelnim kontrolama transformatorskog suda, rashladnog sistema i ostale opreme daje sveobuhvatnu ocenu njegove pogonske spremnosti. Ipak, konvencionalne ispitne metode po svojoj prirodi ne mogu u potpunosti da obuhvate sve relevantne parametre, kao što su sadržaj vlage u čvrstom delu uljno-papirne izolacije, stanje prekidačkog dela i pogonskog mehanizma TRP, procena degradacije papirne izolacije u ranoj fazi, korozivni potencijal ulja itd. Iz tog razloga razvijene su relativno nove ispitne metode, čija primena dovodi do proširenja dijagnostičkog kapaciteta i poboljšanja procene stanja i rizika eksploatacije ET.

U tom smislu, metoda dielektrične spektroskopije u frekventnom domenu FDS [4] omogućava indirektno određivanje-procenu sadržaja vlage u čvrstom delu (papiru) uljno-papirne izolacije, što je podatak od velikog značaja za pogon ET jer direktno utiče na dielektričnu izdržljivost izolacije i preostali životni vek transformatora [5,6]. Princip metode je poređenje (što bolje poklapanje) krivih izmerenih dielektričnih odziva i krivih matematičkog modela poznatog sadržaja vlage, na osnovu kojih se indirektno procenjuje sadržaj vlage u ispitivanom ET. Drugi način za indirektno određivanje sadržaja vlage u papirnoj izolaciji je metoda ispitivanja sadržaja vode u uzorcima ulja uz primenu ravnotežnih dijagrama [7]. Za adekvatnu procenu sadržaja vlage u papirnoj izolaciji transformatora primenom ravnotežnih dijagrama neophodan je podatak o temperaturi ulja prilikom uzorkovanja kao i da transformator radi na ujednačenim radnim temperaturama $\geq 40^{\circ}\text{C}$, kako bi se uspostavila termodinamička ravnoteža. Za obe metode je od značaja što tačnije odrediti temperaturu ulja transformatora. Direktno određivanje sadržaja vlage u uzorcima papira nije tehno-ekonomski opravdano raditi kod ET u pogonu jer podrazumeva otvaranje i dekomponovanje aktivnog dela/namotaja radi pristupa papirnoj izolaciji pojedinačnih namotaja.

Konvencionalna metoda merenja električnih (omskih) otpornosti namotaja podrazumeva merenja po završenoj operaciji prebacivanja položaja TRP, zbog čega se u novije vreme zove i merenje „statičkih“ otpornosti namotaja, daje pouzdanu informaciju o stanju biračkih i prebiračkih kontakata TRP. Analizom karakteristika promene otpornosti namotaja sa položajem regulacije može se dobiti i podatak o stanju radnih kontakata prekidačkog dela TRP, s obzirom da oni učestvuju u električnoj vezi namotaja za svaku parnu i neparnu poziciju regulacije. Metoda DRM [8] omogućava dobijanje detaljnije informacije o stanju mehaničkog sklopa TRP i komponenti prekidačkog dela TRP, radnih i prelaznih kontakata, prigušnih otpornika i akumulatora energije (opruga) [9,10]. Izvodi se istom prilikom uz istu mernu opremu i ispitnu šemu kao pri merenju omskih otpornosti namotaja, tako da u suštini predstavlja njenu nadogradnju. Kako se merenja vrše tokom trajanja procesa prebacivanja položaja TRP usvojen je naziv merenja „dinamičkih“ otpornosti namotaja. Princip metode DRM je u snimanju karakteristike tranzijentne promene (propada) merne struje tokom procesa promene pozicije TRP, uz istovremeno merenje struje motora pogona TRP, čijom se analizom dobija uvid u stanje prekidačkog dela i mehaničkog sklopa TRP.

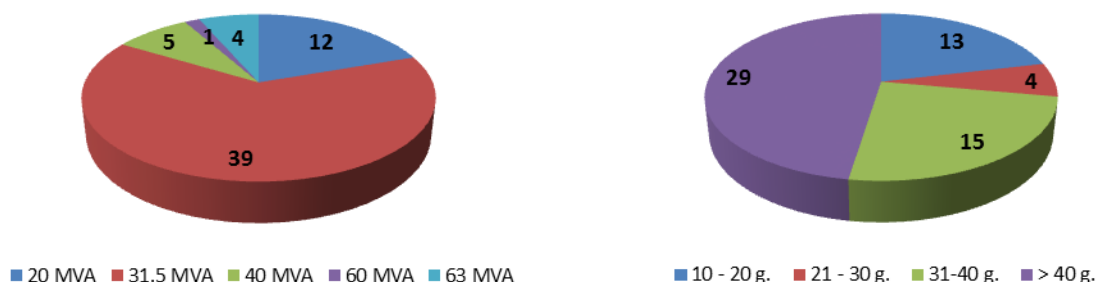
Procenu ostarelosti papirne izolacije ET u pogonu, kao i sadržaj vlage u papirnoj izolaciji, nije moguće vršiti direktnim merenjima, već se ona indirektno procenjuje na osnovu izmerenog sadržaja određenih jedinjenja u ulju koja nastaju degradacijom papirne izolacije, tzv. markera degradacije. Kao markeri degradacije celulozne izolacije transformatora u pogonu do sada su korišćena sledeća jedinjenja rastvorena u ulju: derivati furana, ugljenmonoksid (CO), ugljendioksid (CO₂) a kao novi markeri uvedeni su metanol (CH₃OH) i etanol (C₂H₅OH).

U Institutu Nikola Tesla (INT) je razvijena metoda za kvantitativno određivanje sadržaja metanola i etanola koja je integrisana sa metodom za određivanje sadržaja gasova rastvorenih u ulju i biće deo novog standarda IEC Technical Report 63025 "Insulating liquids – quantitative determination of methanol and ethanol in insulating liquids" [6]. Metanol i etanol rastvoreni u ulju uz furane mogu dati kompletniju sliku o stepenu degradacije uljno-papirne izolacije, a pokazalo se veoma korisnim i uključivanje metanola i etanola u dijagnostiku kvarova ET putem gasnohromatografske analize ulja (GH). S obzirom da se ova jedinjenja, a naročito metanol, javljaju u ranoj fazi degradacije papirne izolacije, njihovo prisustvo može ukazati i na kvar koji je zahvatio čvrstu izolaciju ET čime je dijagnostika termičkih kvarova kod ET unapređena.

Novе metode ispitivanja korozivnosti ulja prema bakru i srebru (testovi korozije i metode kvantifikacije korozivnih sumpornih jedinjenja) daju kompletnu sliku o rizicima eksploatacije ET sa korozivnim uljem, uvid u korozivni potencijal ulja i vrstu prisutnih korozivnih jedinjenja sumpora, sa krajnjim ciljem primene adekvatnih korektivnih mera i metoda za produženje životnog veka ET sa korozivnim uljem.

ODABIR ENERGETSKIH TRANSFORMATORA OD INTERESA

Za potrebe unapređenja održavanja energetskih transformatora i poboljšanja procene potrošenog radnog veka urađena je studija [6] u okviru koje su izvršena električna i hemijska ispitivanja novim metodama na reprezentativnom broju transformatora napona 110/x kV u distributivnom sistemu JP EPS. Odabir transformatora izvršen je na osnovu rezultata ispitivanja dobijenih u okviru ranije izvršenih preventivnih održavanja, pri čemu su isti ukazivali na lošije stanje transformatora usled: povećanog sadržaja vlage u izolacionom sistemu, povećanog sadržaja derivata furana u ulju, povećanog grejanja u transformatoru, korozivnosti ulja, neispravnog rada TRP. Izabran je ukupno 61 transformator za hemijska ispitivanja izolacionog ulja, sa naznačenom snagom u opsegu 20-63 MVA i godinom proizvodnje od 1957. do 2006. (Slika 1), od kojih je izdvojen preliminarni spisak od 20 transformatora za električna ispitivanja. U skladu sa mogućnostima organizacije ispitivanja i raspoloživosti transformatora za njih, električna ispitivanja izvršena su na ukupno 12 transformatora tokom perioda izrade Studije (Tabela 1).



SLIKA 1 – PREGLED ODABRANIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA 110/X KV ZA PRIMENU NOVIH HEMIJSKIH METODA ISPITIVANJA

REZULTATI ISPITIVANJA TRANSFORMATORA METODAMA DRM I FDS

Rezultati ispitivanja TRP transformatora metodama DRM i merenjem statičkih otpornosti namotaja prikazani su u tabeli 1 u vidu ocena stanja komponenti TRP, zajedno sa ocenama rezultata hemijskih ispitivanja uzoraka ulja iz prekidačkog dela TRP metodom gasne hromatografije, gde je bilo moguće uzorkovanje ulja.

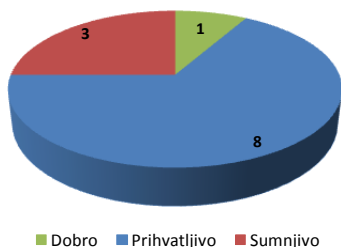
Ocene stanja komponenti su definisane u skladu sa proračunom indeksa zdravlja ET [11], celobrojnim numeričkim vrednostima od 0 do 3, gde najveća ocena 3 znači dobro stanje, nastavak normalnog pogona, a najmanja 0 loše stanje, kada ET nije za pogon i potrebne su hitne korektivne mere. U slučajevima kada su karakteristike pogoršane, ali su i dalje u prihvatljivim granicama, dodeljuje se ocena 2 - prihvatljivo stanje, nastavak pogona uz pooštrenu kontrolu. Kada su karakteristike pogoršane tako da mogu da utiču na sigurnost pogona ET, dodeljuje se ocena 1 - sumnjivo stanje, nastavak pogona uz korektivne mere u skorijem periodu.

TABELA 1 - OCENE STANJA TRP TRANSFORMATORA NA OSNOVU REZULTATA METODA DRM I MERENJA STATIČKIH OTPORNOSTI NAMOTAJA

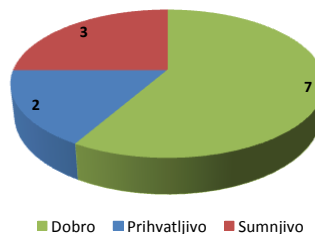
R.br.	Transformator	Naznačena snaga (MVA)	Godina proizvodnje/remonta	Prekidački deo i mehanički sklop, metoda DRM	Biračko/predbirački deo, Metoda merenja statičkih otpornosti	Ocena GH analize ulja iz suda TRP
1.	ET 1	31,5	1982.	2	3	-
2.	ET 2	31,5	1986.	2	3	3
3.	ET 3	31,5	1970./2004.	3	3	-
4.	ET 4	31,5	1985.	2	2	3
5.	ET 5	31,5	2006.	2	3	3
6.	ET 6	20	1982.	2	2	-
7.	ET 7	60	1969.	1	1	-
8.	ET 8	31,5	1980.	2	3	1
9.	ET 9	20	1957.	1	3	-
10.	ET 10	20	1961.	2	3	-
11.	ET 11	20	1962.	1	1	-
12.	ET 12	20	1969.	2	1	3

Analizom prikazanih ocena može se uočiti da je kod polovine transformatora stanje TRP na osnovu rezultata metode DRM lošije nego što se može zaključiti samo na osnovu rezultata metode merenja statičkih otpornosti namotaja (slika 2), što je posebno izraženo kod ET 9 gde je primenom metode DRM stanje TRP sa kategorije 3 - dobro prešlo u kategoriju 1 - sumnjivo. Drugim rečima, primenom obe metode dobija se pouzdanija slika stanja celokupne TRP. Za ocenu stanja TRP od značaja je i GH analiza uzorka ulja iz suda prekidačkog dela, jer može da uputi na kvar u ranoj fazi, koji još uvek nije toliko izražen da bi bio uočen električnim ispitivanjima. Tako je kod ET 8, na osnovu GH analize ulja, TRP ocenjena kao sumnjiva na prisustvo termičkog kvara (lokalno pregrevanje) dok su rezultati metode DRM bili prihvatljivi i još uvek nisu predviđali korektivne mere. Na ostalim transformatorima rezultati GH analize su potvrdili prihvatljivo stanje prema rezultatima metode DRM.

TRP - prekidački deo i mehanički sklop

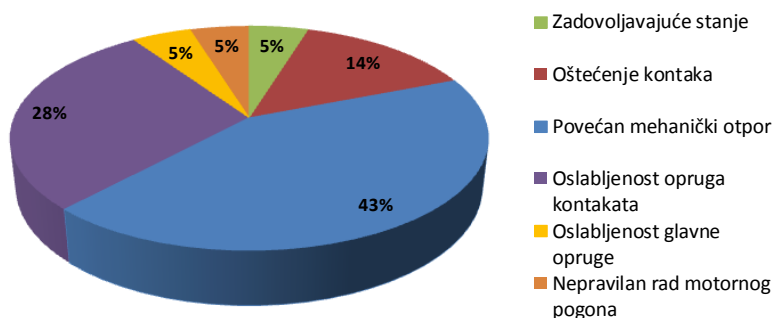


TRP - biračko/predbirački deo



SLIKA 2 – OCENA STANJA KOMPONENTI TRP NA OSNOVU METODA DRM (LEVO) I MERENJA STATIČKIH OTPORNOSTI (DESNO)

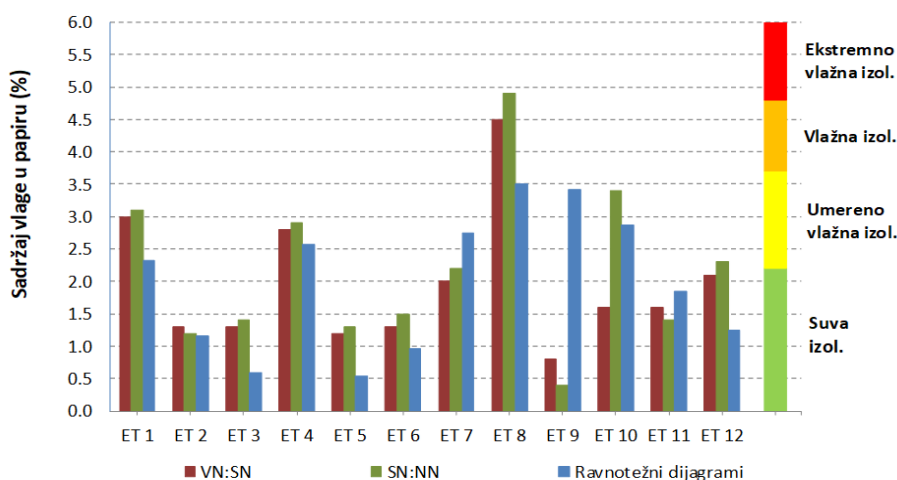
Na slici 3 prikazana je raspodela nepravilnosti u radu prekidačkog dela i mehaničkog sklopa TRP utvrđenih na ispitivanim transformatorima metodom DRM, gde se može uočiti dominantno prisustvo mehaničke komponente, što je i očekivano imajući u vidu starost transformatora i zamor materijala.



SLIKA 3 – RASPODELA NEPRAVILNOSTI U RADU PREKIDAČKOG DELA I MEHANIČKOG SKLOPA TRP UTVRĐENIH METODOM DRM

Rezultati procene sadržaja vlage u papiru na 12 transformatora metodom FDS prikazani su na slici 4, uporedo sa procenom primenom ravnotežnih dijagrama Perrier-Lukic [7] i kriterijumskim vrednostima za kategorije izolacije prema sadržaju vlage u papiru [4]. Izvesne razlike procena između dve metode su očekivane, imajući u vidu da metoda FDS obuhvata samo izolaciju između namotaja, dok metoda ravnotežnih dijagrama obuhvata celokupnu čvrstu izolaciju ET, tako da se može zaključiti da su slaganja zadovoljavajuća. Kod određenih ET za procenu prema metodi ravnotežnih dijagrama nedostajao je podatak o temperaturi ulja prilikom uzorkovanja, ili je radna temperatura ulja bila niža od 40 °C, tako da je prikazana procenjena vrednost sadržaja vlage u papiru iz ranijih godina.

Na osnovu prikazanih rezultata može se uočiti da je polovina ispitanih transformatora sa nešto pogoršanim karakteristikama, sa umereno vlažnom izolacijom, dok jedan transformator ima znatno pogoršane karakteristike sa ekstremno vlažnom izolacijom (ET 8). Preostali transformatori su u dobrom stanju, sa suvom izolacijom. Vrednosti procene metodom FDS za transformator ET 9 ne mogu se uzeti kao pouzdane iz razloga što nije bilo moguće dobiti dobro poklapanje izmernih dielektričnih odziva sa krivom matematičkog modela. U tom slučaju za ocenu stanja čvrste izolacije relevantna je samo procena putem ravnotežnih dijagrama Perrier-Lukic. Velika razlika sadržaja vlage između pojedinačnih namotaja kod transformatora ET 10 je najverovatnije posledica nedovoljno efikasnog procesa sušenja izolacije, izvršenog u nekom prethodnom periodu.



SLIKA 4 – REZULTATI PROCENE SADRŽAJA VLAGE U PAPIRU METODOM FDS I PUTEM RAVNOTEŽNIH DIJAGRAMA SA DATIM KRITERIJUMSKIM VREDNOSTIMA ZA KATEGORIJE IZOLACIJE; VN, SN, NN - NAMOTAJ VISOKOG, SREDNJEG I NISKOG NAPONA

REZULTATI ISPITIVANJA TRANSFORMATORA NOVIM HEMIJSKIM METODAMA ISPITIVANJA

Sadržaj metanola i etanola u ulju

Intenzivno se istražuje pod kojim uslovima i kada novi markeri degradacije (metanol i etanol) nastaju i koja je njihova zavisnost od ostalih pokazatelja ostarelosti celulozne izolacije. Ispitivanja vršena od strane različitih autora pokazuju da metanol predstavlja indikator rane faze degradacije celulozne izolacije. U kasnijim fazama degradacije celuloze dolazi do porasta koncentracije derivata furana rastvorenih u ulju, a moguće je smanjenje koncentracije metanola rastvorenog u ulju [12], usled konverzije metanola u druge produkte starenja [13,14]. S obzirom da je kvantifikacija furana u ranim fazama degradacije čvrste izolacije, posebno u suvim sistemima sa novim uljem, otežana zbog niske proizvodnje i rastvorljivosti u ulju, metanol se pokazao kao komplementarni marker degradacije celuloze u ranoj fazi, te zajedno, metanol, oksidi ugljenika i furani pokrivaju sve faze degradacije celulozne izolacije ET.

Primenom nove hemijske metode ispitivanja sadržaja metanola (MeOH) i etanola (EtOH) u izolacionim uljima, kod dva ET je utvrđena povišena koncentracija metanola u ulju. Ocene stanja ET na osnovu hemijskih ispitivanja su, kao i kod električnih ispitivanja, definisane u skladu sa proračunom indeksa zdravlja. Izmerene koncentracije metanola i etanola u ulju uključene su u konačnu ocenu ispravnosti ET na osnovu GH analize ulja. S obzirom da se kod predmetnih transformatora na osnovu rezultata izvršene GH analize ulja sumnja na prisustvo toplog mesta u transformatoru sa temperaturama preko 700 °C (ocena 2), povišen sadržaj metanola u ulju upućuje na mogućnost da je toplo mesto zahvatilo čvrstu izolaciju (tabela 2). Uz uvažavanje izmerenog povišenog sadržaja metanola u ulju, oba ET su dobila lošiju ocenu – 1, koja zahteva primenu odgovarajućih korektivnih mera.

TABELA 2 - OCENE STANJA ET NA OSNOVU GH ANALIZE ULJA SA I BEZ MERENJA SADRŽAJA METANOLA I ETANOLA

R.br.	Transformator	Naznačena snaga (MVA)	Godina proizvodnje	GH analiza ulja bez merenja MeOH i EtOH	GH analiza ulja sa merenjima MeOH i EtOH
1.	ET 13	63/63/21	1969.	2	1
2.	ET 14	63	1982.	2	1

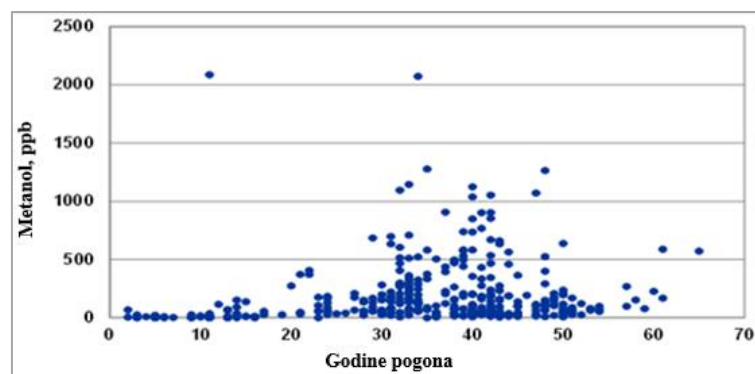
Pored toga, kod oba ET uočen je porast koncentracije metanola u relativno kratkom vremenskom periodu od tri (ET 13) i šest meseci (ET 14), koji ukazuje na to da je proces degradacije čvrste izolacije aktivan (tabela 3). Kod ET 13 porast koncentracije metanola prati i veća koncentracija ukupnih derivata furana (12,97 ppm), koja ukazuje na aktivan i izuzetno visok stepen degradacije čvrste izolacije, u skladu sa godinama pogona ET. Kod ET 14, izmerene koncentracije metanola ukazuju na aktivan proces degradacije celulozne izolacije u početnoj fazi, obzirom da su izmerene još uvek relativno niske koncentracije derivata furana (0,4 ppm).

TABELA 3 – PROMENA KONCENTRACIJE METANOLA (MeOH) U ULJU TOKOM POGONA

R.br.	Transformator	Datum	MeOH (ppb)
1.	ET 13	05/09/2019	1264
2.		18/12/2019	3772
3.	ET 14	30/07/2019	2086
4.		22/01/2020	3615

Treba istaći da rezultati procene sadržaja vlage u papiru primenom ravnotežnih dijagrama Perrier-Lukic ukazuju na povišen sadržaj vlage i umerenu ovlaženost papirne izolacije (3-3,5%) kod oba predmetna ET, koja je doprinela povećanoj degradaciji izolacionog sistema, na koju ukazuju pomenuta merenja sadržaja metanola i derivata furana u ulju.

Statističkom obradom rezultata, iz INT baze podataka za 110/x kV ET distributivne mreže JP EPS, dobijena je raspodela sadržaja metanola u ulju u zavisnosti od godina pogona ET (slika 5). Može se primetiti da je sadržaj metanola u ulju uglavnom ispod 1000 ppb, pri čemu najveće koncentracije imaju ET starosti od 30-45 godina, kao i da tokom pogona dolazi do smanjenja sadržaja metanola, što je objašnjeno gore.



SLIKA 5 – RASPODELA APSOLUTNOG SADRŽAJA METANOLA U ULJU U ZAVISNOSTI OD GODINA POGONA ET

Korozivnost izolacionog ulja prema srebru

Međunarodna tela za standardizaciju IEC i ASTM uvela su nove metode ispitivanja korozije prema bakru i srebru. U okviru Studije, u cilju proširenja dijagnostike, procene stanja i rizika eksploatacije ET kod kojih je ranije utvrđena korozivnost ulja prema bakru urađen je ASTM D1275-15 test korozije prema srebru [15], kod ukupno 54 ET. ASTM D 1275-15 test korozije prema srebru analizira problem korozije srebrnih kontakata TRP i uz postojeće dijagnostičke metode ispitivanja TRP (GH analiza, merenje statičkih otpornosti namotaja i DRM), kao i kvantifikaciju sumpornih jedinjenja koja izazivaju koroziju, daje adekvatniji uvid u procenu stanja TRP. Rezultati ASTM D 1275-15 testa korozije prema srebru, ukazali su da su ulja nekorozivna kod 50 ET, dok su ulja četiri ET ocenjena kao „marginalno korozivna“ što znači da je izdvajanje naslaga srebra sulfida prisutno u tragovima.

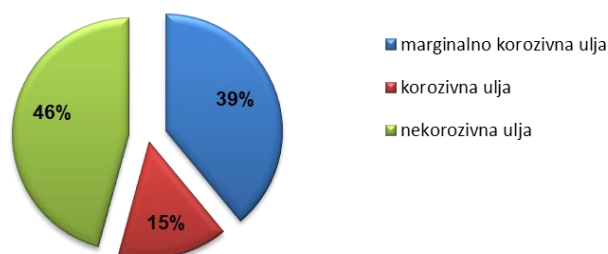
Korozija srebrnih kontakata TRP može biti izazvana prisustvom disulfida i elementarnog sumpora u ulju (posebno izdvajanje srebro sulfida u biračkom delu TRP). Naslage sulfida metala na kontaktima TRP (srebro (I) sulfid na kontaktima biračkog dela TRP) povećavaju prelazne otpore i uzrokuju grejanje, koje dalje utiče na disfunkciju TRP i povećava rizik od havarije ET [16].

Kvantifikacija korozivnih sumpornih jedinjenja

Pored kvalitativnih testova korozije metala: bakra i srebra, detekcija i kvantifikacija korozivnih jedinjenja sumpora omogućava adekvatniji uvid u korozivni potencijal ulja i definiše prioritete za primenu odgovarajućih korektivnih mera u cilju produženja životnog veka ET.

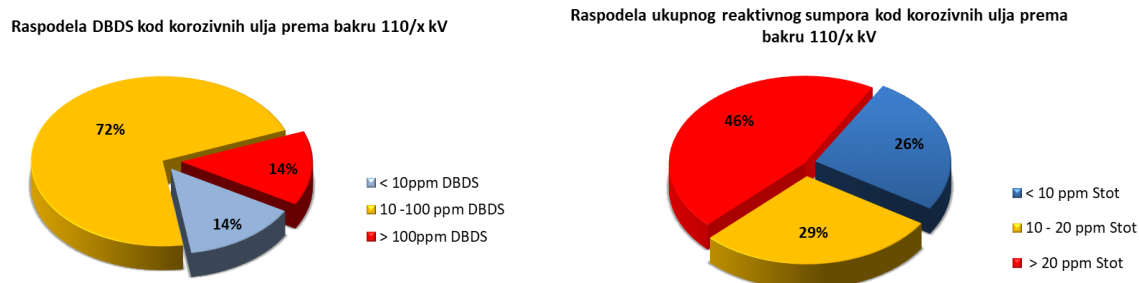
Statistički pregled stanja 110/x kV ET distributivne mreže JP EPS sa uljima korozivnim prema bakru prikazan na slici 6, ukazuje da oko 15% ET sadrži korozivna ulja, kod kojih je potrebno preduzeti pooštrene kontrole i odgovarajuće korektivne mere (dodatak metal pasivatora, obrada ulja rerafinacijom ili zamena ulja).

Kod 35 ET obuhvaćenih studijom, kod kojih je utvrđena korozivnost ulja prema bakru (primenom postojećeg IEC 62535 testa korozije sa bakarnim provodnikom i izolacionim papirom) izvršeno je merenje sadržaja dibenzil disulfida – DBDS (izrazito korozivnog jedinjenja prema bakru) i ukupnih reaktivnih sumpornih jedinjenja (ukupnog sadržaja disulfida, merkaptana i elementarnog sumpora).



SLIKA 6 - PRISUSTVO KOROZIVNIH ULJA PREMA BAKRU U DISTRIBUTIVNIM ET, 110/X KV U JP EPS

Procentualni udeo koncentracije DBDS i ukupnog reaktivnog sumpora kod 35 ET sa korozivnim uljem prikazan je na slici 7.



SLIKA 7 – RASPODELA KONCENTRACIJE DBDS-A (LEVO) I UKUPNOG REAKTIVNOG SUMPORA (DESNO) KOD KOROZIVNIH ULJA, KOD 35 DISTRIBUTIVNIH ET 110/X KV U JP EPS

Kod transformatora čija su ulja izraženo korozivna, oko 70% sadrži DBDS u koncentraciji između 10 i 100 ppm (slika 7, levo). Prosečan sadržaj DBDS je oko 50 ppm, a maksimalna koncentracija DBDS-a iznosi 193 ppm. Kod većine transformatora ukupni reaktivni sumpor prati sadržaj DBDS-a, tj. praktično sav reaktivni sumpor čini DBDS u korozivnim uljima distributivnih transformatora (slika 7, desno). Međutim, interesantno je uočiti da postoji nekoliko transformatora čija su ulja izraženo korozivna, a pritom sadrže niske koncentracije dibenzil disulfida (DBDS < 5 ppm). Ova ulja sadrže visok sadržaj drugih disulfida (ukupni reaktivni sumpor iznad 20 ppm).

PREPORUKE ZA PRIMENU NOVIH ISPITNIH METODA I POTREBNIH KOREKTIVNIH MERA

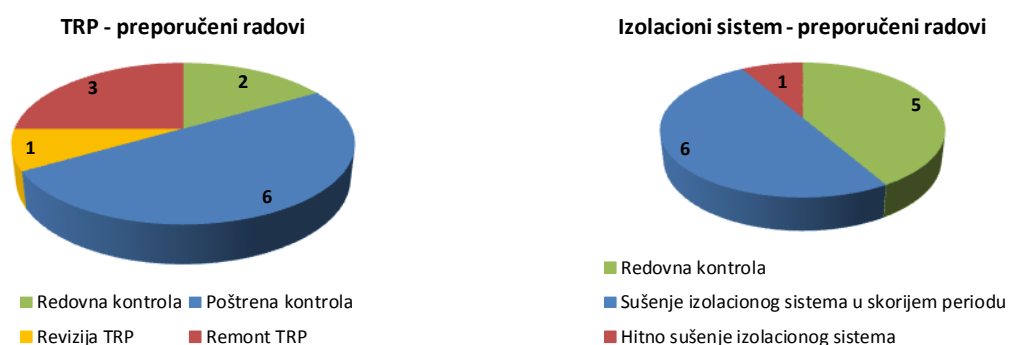
Periodika redovne preventivne kontrole stanja TRP metodom DRM nije definisana u praksi s obzirom da je metoda novija pa samim tim još uvek nije uvrštena u redovni obim električnih ispitivanja preventivne kontrole. Preporuka je da se svakako izvrši pre i posle redovnih revizija TRP, predviđenih od strane većine proizvođača na

svakih 100.000 prorada [17,18,19], čime se dobija detaljniji uvid u stanje pojedinih elemenata TRP koje nije uvek moguće utvrditi tokom revizije, pre svega mehaničkih komponenti i sklopova. Merenjem nakon revizije pored potvrde njene uspešnosti dobijaju se i referentne vrednosti za praćenje stanja TRP tokom budućih kontrola. Imajući u vidu navedeno, preporuka je da se redovna periodika kontrole stanja TRP metodom DRM vrši oko svakih 30.000 prorada na ET sa srednjim i niskim nivoom opterećenja, odnosno oko 20.000 prorada na ET sa visokim nivoom opterećenja i/ili čestim preopterećenjima. U slučaju pooštrene kontrole stanja TRP nju bi trebalo vršiti na polovini navedenih intervala. Na svim ET redovnu kontrolu bi trebalo vršiti na svaka dva ciklusa redovne preventivne kontrole konvencionalnim električnim metodama, odnosno na svakih osam godina pogona, ukoliko se u navedenom periodu ne dostignu gore navedeni brojevi prorada. Vanrednu kontrolu stanja TRP metodom DRM treba vršiti u slučajevima kada se posumnja na njenu ispravnost, na osnovu rezultata GH analize uzoraka ulja i/ili zapažanja iz pogona (ispadi motora pogona TRP, abnormalni zvuci i vibracije i sl.).

Metodu FDS treba sprovoditi tokom fabričkih prijemnih ispitivanja novih i remontovanih ET 110/x kV, pre svega kao potvrdu kvaliteta izvršenih radova, a zatim radi dobijanja referentnih vrednosti za praćenje stanja tokom pogona ET. Na ET koji su u pogonu, metodu FDS treba primenjivati nakon procesa sušenja izolacionog sistema na terenu, kao i u slučajevima kada ne postoje procene sadržaja vlage putem ravnotežnih dijagrama i/ili ukoliko rezultati konvencionalnih hemijskih i električnih metoda ispitivanja ukazuju na povećanu vlagu izolacije.

Preporuka za ispitivanje sadržaja gasova u ulju TRP, ukoliko postoje tehničke mogućnosti za uzimanje uzorka ulja, dolazi tek nakon što se na osnovu rezultata GH analize ulja iz glavnog suda posumnja na neispravan rad TRP. U skladu sa dobijenim rezultatima daju se dalje preporuke: električna merenja i/ili pooštrena kontrola TRP analizom ulja. Pored toga, preporuka je da se GH analiza ulja TRP vrši zajedno sa električnim ispitivanjem metodom DRM.

Korektivne mere na 12 ispitivanih ET na osnovu rezultata električnih ispitivanja date su na slici 8, pri čemu je preporučeno da se na svim ET sa povećanim sadržajem vlage uradi sušenje izolacionog sistema zbog negativnog uticaja povećanog sadržaja vlage u papiru na pogon i preostali životni vek ET.



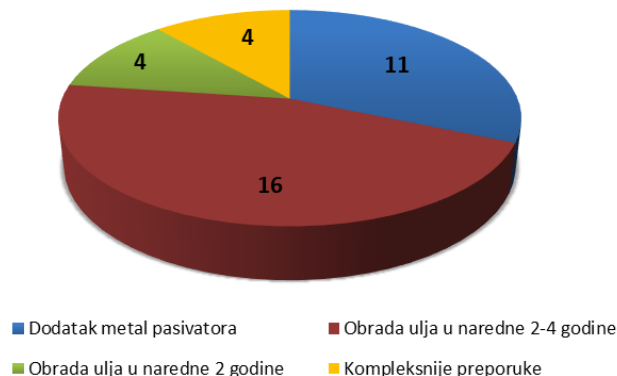
SLIKA 8 – PREPORUČENE KOREKTIVNE MERE NA ISPITIVANIM ET NA OSNOVU REZULTATA ELEKTRIČNIH ISPITIVANJA

Dalje praćenje stanja dva ET kao i svih distributivnih ET napona 110/x kV ispitivanjem sadržaja metanola i etanola u ulju preporučuje se zajedno sa ispitivanjem sadržaja gasova u ulju, prema definisanoj periodici u okviru redovnih izveštaja o ispitivanju ulja. Ova analiza je integrisana u gasnohromatografsku analizu sadržaja gasova u ulju, tako da se iz istog uzorka dobijaju važne informacije o pogonskom stanju ET, eventualnom prisutnom kvaru i zahvaćenosti čvrste izolacije kvarom.

S obzirom da je kod predmetnih transformatora (ET 13 i ET 14) utvrđena umerena ovlaženost čvrste izolacije primenom ravnotežnih dijagrama, preporučena je primena procesa sušenja ulja sa sušenjem i ispiranjem čvrste izolacije, u cilju produženja životnog veka ET.

Primenom novih hemijskih metoda ispitivanja ulja u cilju kvantifikacije korozivnih sumpornih jedinjenja, kod 35 ET obuhvaćenih Studijom utvrđen je korozivni potencijal ulja na osnovu koga su date preporuke za izvršenje korektivnih mera (dodatak metal pasivatora, obrada ulja rafinacijom, itd.) u cilju smanjenja rizika eksploatacije ET sa korozivnim uljem i produženja životnog veka ET. Do primene određene korektivne mere, preporučuje se praćenje utroška korozivnih sumpornih jedinjenja na godišnjem nivou.

Korektivne mere kod 35 ET sa korozivnim uljima prema bakru prikazane su na slici 9. Kod 31 ET preporučeno je rešavanje problema korozivnosti ulja dodatkom metal pasivatora kao privremeno alternativno rešenje ili obradom/zamenom ulja kao dugoročno rešenje, dok su kod četiri ET date preporuke za primenu kompleksnijih korektivnih mera, koje pored rešavanja problema korozivnosti ulja zahtevaju i dodatne akcije (remont TRP, sušenje ulja sa sušenjem i ispiranjem čvrste izolacije, itd.), a u skladu sa rezultatima električnih i hemijskih ispitivanja.



SLIKA 9 – PREPORUČENE KOREKTIVNE MERE KOD ET SA KOROZIVNIM ULJEM NA OSNOVU REZULTATA HEMIJSKIH I ELEKTRIČNIH ISPITIVANJA

ZAKLJUČAK

Metoda DRM se pokazala kao veoma korisna u proceni stanja TRP, kod šest od ispitanih 12 transformatora rezultati ispitivanja su ukazali da postoje određene nepravilnosti u radu TRP, a koja je klasičnom metodom merenja statičkih otpornosti namotaja ocenjena da je u dobrom stanju, pa se preporučuje njeno postepeno uvođenje u kontrolu stanja TRP. GH analiza uzoraka ulja iz prekidačkog dela TRP se takođe pokazala kao korisna jer može da ukaže na pojavu kvara u začetku, kao i da potvrdi nalaze metode DRM.

Sadržaj vlage u papiru je podatak od velikog interesa za pogon i preostali životni vek ET, tako da ga je potrebno odrediti-prociniti pomoću metoda FDS i/ili ravnotežnih dijagrama, pri čemu se najtačniji rezultati dobijaju kombinacijom obe metode.

Uvođenjem novih markera degradacije čvrste izolacije, metanola i etanola, uz već postojeće okside ugljenika i derivate furana, dobija se kompletnija slika o stepenu degradacije čvrste izolacije, ali i o zahvaćenosti čvrste izolacije eventualno prisutnim kvarom u transformatoru. Kod dva ET rezultati ispitivanja sadržaja metanola u ulju upućuju na sumnju da prisutan termički kvar zahvata čvrstu izolaciju.

Kvantifikacija korozivnih sumpornih jedinjenja kod 35 ET sa korozivnim uljem omogućila je bolji uvid u korozivni potencijal svakog pojedinačnog ulja. Rizik od taloženja bakar (I) sulfida u papirnoj izolaciji i na bakarnim kontaktima koji dalje mogu dovesti do kvara i/ili proboja namotaja postoji i raste sa eventualnom pojavom toplog mesta u ET, dok su rizici od kvara i/ili havarije usled taloženja srebro (I) sulfida na srebrnim kontaktima TRP niski. Primena adekvatnih korektivnih mera za rešavanje problema korozije, uklanjanjem sumpora obradom ulja je od izuzetne važnosti, radi sniženja rizika eksploatacije ovih ET.

Primenom novih električnih i hemijskih metoda ispitivanja, značajno se proširuje dijagnostički kapacitet i poboljšava procena stanja ET, a samim tim omogućava se primena adekvatnih korektivnih mera i metoda za sniženje rizika eksploatacije i produženje životnog veka ET.

LITERATURA

1. Studija broj 410121 za JP EPS, 2010, „Savremene metode i uređaji za ispitivanje, monitoring i dijagnostiku stanja energetskih i mernih transformatora“, Elektrotehnički institut Nikola Tesla a.d. Beograd, Srbija
2. Interni standard EPS 09-2, 2014, „Ispitivanja i kontrole energetskih transformatora u pogonu“
3. Interni standard EPS 26-1, 2014, „Ispitivanje izolacionih ulja“
4. Studija broj 413021 za JP EPS, 2014, „Unapređenje metoda preventivne kontrole za preciznije i pouzdanije određivanje sadržaja vlage u čvrstom delu uljno-papirne izolacije elektroenergetskih objekata primenom metode frekventno zavisne spektroskopije – frequency domain spectroscopy (FDS)“, Elektrotehnički institut Nikola Tesla a.d. Beograd, Srbija
5. IEC 60076-7, Edition 2.0, 2018, „Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers“
6. Studija broj 420019 za JP EPS, 2020, „Unapređenje održavanja energetskih transformatora i poboljšanje procene potrošenog radnog veka uvođenjem markera degradacije transformatorskog ulja“, Elektrotehnički institut Nikola Tesla a.d. Beograd, Srbija
7. Vasovic.V, Lukic J., Perrier.C, Coulibaly L., 2014, „Equilibrium Charts for Moisture in Paper and Pressboard Insulations in Mineral and Natral Ester Transformer Oil“, „IEEE Electrical Insulation Magazine“, Vol.30, No.2.

8. J. Ponočko, J. Lazić, Đ. Jovanović, B. Pejović, D. Ilić, P. Radosavljević, Lj. Novaković, 2014, „Iskustva tokom revizija teretnih regulacionih preklopki energetskih transformatora 110 kV/x na mestu njihove ugradnje u distributivnim postrojenjima“, CIREC Srbija, STK 3/EC 3, R-3.04
9. Jur J. Erbrink, 2011, „On-load Tap Changer Diagnosis on High-Voltage Power Transformers using Dynamic Resistance Measurements“, PhD thesis, the Delft University of Technology, The Netherlands
10. TB 761, 2019, „Condition assessment of power transformers“, CIGRE A2 Power transformers and reactors
11. Studija broj 415058 za JP EPS, 2016, „Formiranje metodologije za analizu i smanjenje rizika eksploatacije 110 kV energetskih transformatora u distributivnoj mreži“, Elektrotehnički institut Nikola Tesla a.d. Beograd, Srbija
12. S.Y.Matharage, Q.Liu, Z.D.Wang, 2016, „Aging assessment of kraft paper insulation through methanol in oil measurement“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 3
13. Technical brochure CIGRE WG A2D1.46, 2019, „Field experience with transformer solid insulation ageing markers“, CIGRE, reference: 779
14. Jocelyn Jalbert, Esperanza M. Rodriguez-Celis, Oscar H. Arroyo-Fernández, Steve Duchesne and Brigitte Morin, 2019, „Methanol Marker for the Detection of Insulating Paper Degradation in Transformer Insulating Oil“, Energies, vol. 12
15. ASTM D1275-15: „Standard test method for corrosive sulfur in electrical insulating liquids“
16. Studija broj 413037 za JP EPS, 2014, „Analiza rizika eksploatacije ulja koja sadrže korozivni sumpor“, Elektrotehnički institut Nikola Tesla a.d. Beograd, Srbija
17. V.Ribar (prevod), 1981, „Regulacioni prekidači proizvodnje VEB Transformatorwerk - Karl Liebknecht“, Elektroistok, Beograd, Srbija
18. Elprom-Energo, 1984, „Instruction for mounting operation and repair of On-Load Tap-Changer Type RS-4“, „Elprom-Energo“ Corporation Transformer Plant, Sofia, Bulgaria
19. MR, 2015, „On-Load Tap-Changer OILTAP Operating Instructions“, type M doc. No 4427221/00 EN, type MS doc No. 4440851/00 EN, Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, Germany