

## SPECIFIČNOSTI I ISKUSTVA U PRAKSI ELEKTRIČNIH ISPITIVANJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA 110kV/x U DISTRIBUTIVNIM POSTROJENJIMA

Đ. Jovanović<sup>1)</sup>, Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla", Beograd  
V Radin,  
D. Teslić,  
S. Marinković,  
B. Pejović,  
S. Milosavljević

**Kratak sadržaj:** U radu su prikazana praktična iskustva pri električnim ispitivanjima preventivne kontrole energetskih transformatora (ET) naznačenog napona 110kV/x u transformatorskim stanicama (TS) distributivnih postrojenja. Pored obima i opisa električnih ispitivanja koja Laboratorija za izolacione sisteme Instituta "Nikola Tesla" primenjuje u praksi preventivne kontrole, opisani su i pojedini slučajevi iz prakse. U radu se teži da se pokaže prednost objedinjenog tumačenja rezultata ispitivanja transformatorskog ulja, posebno određivanja sadržaja rastvorenih gasova primenom metode gasne hromatografije (GH) i rezultata svih električnih ispitivanja u cilju pravilne procene pogonskog stanja. Na osnovu toge se procenjuje spremnost ET za nastavak pogona ili daje preporuka za intervenciju radi sanacije uočenog nedostatka i sprečavanja moguće havarije. Ovakav pristup podrazumeva saradnju inženjera elektrotehničke i hemijsko-tehnološke struke. Takođe su navedene i pojedine specifičnosti vezane za održavanje ET naznačenog napona 110kV/x u odnosu na ET naznačenog napona 35kV/x, posebno zbog postojanja uvodnih (provodnih) izolatora (PI) 110kV, teretnih regulatora napona (TRN) odnosno odvodnika prenapona 110kV.

**Ključne reči:** energetski transformator, izolacija, izolaciona ulja, preventivna kontrola, gasna hromatografija, teretni regulator napona, preventivno održavanje, procena pogonskog stanja.

### UVOD

Preventivna kontrola (PK) ET predstavlja skup metoda i postupaka kojima se tokom perioda pogona prati stanje ET i to uljno-papirnog izolacionog sistema, namotaja, magnetnog kola kao i njegovih sklopova, pre svih TRN i PI. Na osnovu pravilne i tačne procene pogonskog stanja moguće je da se preporuča određene aktivnosti, remontu i/ili revizije sa ciljem da se poboljša pogonsko stanje i poveća pouzdanost posmatranog ET. Pored praćenja pogonsko stanja, aktivnost PK usmerena je i na pravovremeno otkrivanje potencijalnih slabih mesta koja bi vremenom mogla da izazovu ozbiljniji kvar, a u najgorem slučaju i havariju sa neželjnim ispadom i prekidom u napajanju potrošača.

Aktivnosti PK praktično započinju pri prijemnim ispitivanjima ET, na početku njegovog životnog veka, pre ulaska u eksploataciju. Skoro sva ispitivanja koja pripadaju PK ulaze u grupu specijalnih prijemnih ispitivanja prema standardu IEC60076 [1] i kao takve ih treba obaviti u kompletnom obimu radi dobijanja referentnih vrednosti.

1) Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, djolejov@ieent.org

Standardna višegodišnja praksa primene PK u pogonu bila je pretežno orijentisana na ET u proizvodnji i prenosu električne energije, u elektranama i to na najveće i najvažnije jedinice – blok-transformatora naznačenih napona do 400kV i naznačenih snaga do 725MVA, zatim transformatore sopstvene potrošnje, odnosno pobudne transformatore, kao i na interkonektivne i transformatore u sistemu prenosa električne energije kojima su pripadali i ET naznačenog napona 110kV/x koji se nalaze u TS 110kV/x.

Preraspodelom odgovornosti u sistemu EPS, transformatorske stanice 110kV/x zajedno sa ET naznačenog napona 110kV/x prelaze pod nadzor i kontrolu distributivnih preduzeća. Stoga se ovim radom želi da prikažu specifičnosti električnih ispitivanja i iskustva u praksi PK na ET 110kV/x s obzirom na činjenicu da su, uvidom u trenutno aktuelne preporuke i pravilnike o održavanju distributivnog elektroenergetskog sistema, njima posvećivana možda nedovoljna pažnja [2] [3]. Posebno, ako se uzme u obzir da većina ET 110kV/x ima PI, odnosno TRN kojima se treba da posveti posebna pažnja, ako se uzme u obzir statistika uzroka kvarova ET 110kV/x [4].

## **METODE ISPITIVANJA KOJA SE PRIMENJUJU PRI PREVENTIVNOJ KONTROLI ET**

Savremena metodika PK podrazumeva multidisciplinarni pristup - objedinjeno i sveobuhvatno tumačenje rezultata hemijskih ispitivanja uzoraka ulja, rezultata električnih ispitivanja, ali i termovizijskih i drugih ispitivanja ET na terenu.

Hemijska ispitivanja iz domena PK, koja se obavljaju u specijalizovanim laboratorijama, obuhvataju ispitivanja uzorka transformatorskog ulja i to:

- određivanje fizičko-hemijskih i električnih karakteristika ulja – određivanje dielektrične čvrstoće (probojnosti) ulja
- određivanje sadržaja rastvorenih gasova u ulju metodom gasne hromatografije (GH)
- određivanje sadržaja vode i produkata furana u ulju
- korozivnost ulja – afinitet ka stvaranju naslaga bakar (I) sulfida

Poseban značaj hemijskih ispitivanja je činjenica da se ona obavljaju na uzorcima uzetim u režimu normalnog pogona i opterećenja i stoga u značajnoj meri verno odslikavaju trenutno stanje ET i najčešće mogu da ukažu na postojanje defekta još u njegovom začetku.

Električna ispitivanja iz domena PK obuhvataju klasična električna ispitivanja koja se obavljaju već više decenija, pre svega merenje izolacione otpornosti i merenje omskih otpornosti namotaja. Vremenom su se razvile i započele primenu i ostale metode. Međutim, nije isplativo, često ni tehnički opravdano sprovoditi kompletan obim raspoloživih metoda ispitivanja, osim u slučajevima kada je kvar detektovan nekom od metoda, ali nije jasno uspostavljena korelacija između rezultata ispitivanja i karakteristika poznatih kvarova na ET. Zato se električne metode ispitivanja ET, koja se primenjuju u praksi PK, mogu da podele u dve kategorije [5] [6]:

- i. Osnovna električna ispitivanja se obavljaju na ET tokom redovnog remonta, sa periodom najčešće ne dužim od 4 godine i imaju za cilj da daju potvrdu da je ET spreman za nastavak pogona i to:
  - Ispitivanje električnog izolacionog sistema (EIS) namotaja transformatora – merenje izolacione otpornosti, uz određivanje indeksa polarizacije, merenje faktora dielektričnih gubitaka-tgδ i kapaciteta EIS namotaja ET.
  - Ispitivanje EIS na PI 110kV koji imaju pristupačan merni priključak - merenje faktora dielektričnih gubitaka-tgδ i kapaciteta EIS PI.
  - Merenje omskih otpornosti namotaja ET, uz kontrolu rada TRN merenjem otpornosti namotaja u svim položajima regulatora.
- ii. Dodatna električna ispitivanja treba da daju bliže informacije o stanju magnetnog kola i geometrije namotaja. Obavljaju se takođe redovno sa periodom koja može biti i duži u odnosu na osnovna ispitivanja, posebno kada se radi o novim jedinicama, koje su na početku perioda eksploatacije, ali i vanredno u slučajevima kada se sumnja da je došlo do oštećenja u aktivnom delu ET, na osnovu rezultata hemijskih ispitivanja ulja. U ova ispitivanja spadaju:
  - Merenje odnosa transformacije uz kontrolu sprege.
  - Merenje struja i snaga praznog hoda pri sniženom naponu (monofazno 220V ili trofazno 3x380V, 50Hz).
  - Merenje induktivnosti usled rasipanja pri sniženom naponu.
  - Snimanje frekventnog odziva namotaja ET (metode SFRA, FRA).
  - Određivanje sadržaja vlage u čvrstom delu uljno-papirne izolacije – metoda frekventno zavisne spektroskopije (FDS), metoda merenja povratnog napona (RVM), merenje struja polarizacije-depolarizacije (PDC).

Opšta karakteristika električnih ispitivanja – osnovnih i dodatnih je da se ona obavljaju u beznaponskom stanju, što zahteva isključenje ET iz pogona, obezbeđenje i kompletno razvezivanje. Pored navedenih hemijskih i električnih ispitivanja, za kvalitetnu PK nezaobilazna je i termovizijska kontrola koja je odvojena od pomenutih, ali samo zbog svoje fizičke prirode parametara koju prati, ali nikako zbog eventualne manje važnosti. Naprotiv, termovizijska kontrola je veoma značajna u sklopu redovne PK elektroenergetskih (EE) distributivnih postrojenja, pa tako i ET napona 110kV/x i niže. Slično kao i uzorkovanje i hemijska ispitivanja ulja, prednost termovizijske kontrole je što se ona takođe vrši u redovnom pogonu, bez potrebe za isključenjem ET ili dela postrojenja radi ispitivanja i kao takva takođe može bitno da odredi obim električnih ispitivanja koja će se obaviti u beznaponskom stanju.

## KRATAK OPIS ELEKTRIČNIH METODA PREVENTIVNE KONTROLE ET 110kV/x U DISTRIBUTIVNIM POSTROJENJIMA

**Ispitivanje električnog izolacionog sistema – merenje izolacione otpornosti, merenje faktora dielektričnih gubitaka-tgδ i kapaciteta EIS namotaja transformatora** – Ispitivanje EIS namotaja predstavlja osnovno električno ispitivanje koje ima za cilj da sagleda opšte stanje EIS namotaja sa gledišta starenja uljno-papirne izolacije i prisustva vlage kao najznačajnijeg produkta procesa starenja. Merni spojevi izabrani su tako da obezbede ispitivanje između svakog namotaja međusobno - šema izolovanog objekta, kao i između svakog pojedinačnog namotaja i mase (koja predstavlja uzemljeno magnetno kolo i transformatorski sud) - šema uzemljenog objekta. Izvodi svakog namotaja pojedinačno (uključujući i neutralnu tačku kod namotaja spregnutog u zvezdu) se kratko spoje provodnikom i na taj način se dobijaju merne elektrode: namotaja visokog napona (VN), namotaja srednjeg napona (SN), namotaja niskog napona (NN) i mase (M). Merenje izolacione otpornosti, odnosno merenje faktora dielektričnih gubitaka-tgδ i kapaciteta EIS namotaja obavlja se u istim mernim spregama datim u Tabeli 1:

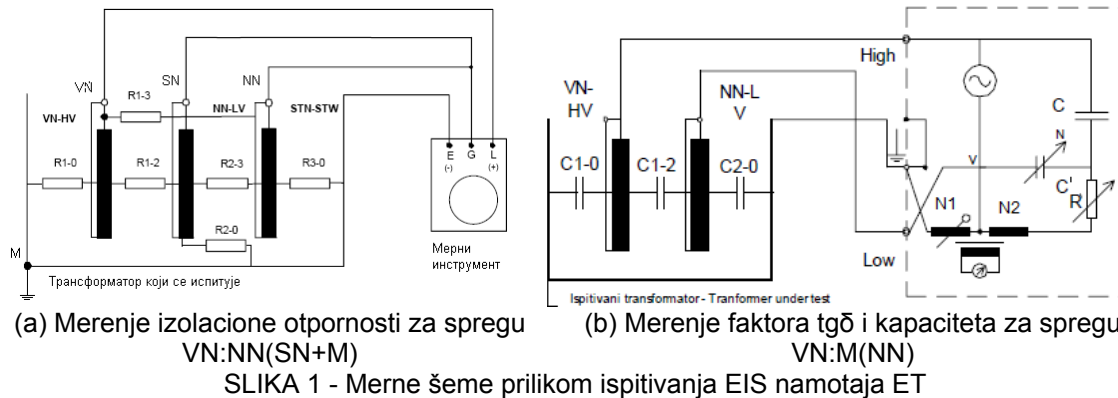
TABELA 1 - Prikaz mernih šema pri ispitivanju EIS namotaja ET

Merne šeme	Šema "izolovanog objekta"			Šema "uzemljenog objekta"		
Dvonamotajni ET	VN:NN (M)			VN:M (NN)	NN:M (VN)	
Tronamotajni ET	VN:SN (NN+M)	VN:NN (SN+M)	SN:NN (VN+M)	VN:M (SN+NN)	SN:M (VN+NN)	NN:M (VN+SN)

Treba napomenuti da su, pored struje kroz zapreminu izolacije između mernih elektroda posmatranog dela EIS, a koja je posledica prisustva vlage i ostalih produkata starenja i čija se vrednost želi izmeriti, prisutne i parazitne struje odvoda prema ostalim mernim elektrodama koje nisu od interesa, uključujući i površinsku komponentu struje usled prisustva površinskih nečistoća i površinske kondenzovane vlage na PI. Zato je poželjno radi eliminisanja negativnog uticaja navedenih parazitnih struja korišćenje zaštitne elektrode – guard, čime se one odvede van mernog kruga. U prethodnoj tabeli u zagradi su navedene elektrode ispitivanog objekta koje se u cilju eliminacije parazitnih struja dovode na zaštitnu elektrodu.

Merenje izolacione otpornosti EIS namotaja ET se obavlja specijalizovanim mernim uređajem – megaohmmetrom (megerom) koji najčešće ima ugrađen stabilan izvor jednosmernog ispitnog napona tipično 1000, 2500 ili 5000Vdc i kolo za merenje struje, te se kao rezultat direktno dobijaju vrednosti izolacione otpornosti u MΩ. Struja kroz izolaciju je vremenski promenljiva i zavisi od trenutka uspostavljanja stabilnog ispitnog napona, tako da se beleže vrednost izolacione otpornosti nakon 15s, 60s, 2min, 5min i 10min od početka merenja. Odnos vrednosti otpornosti izmerene nakon 10min i 60s predstavlja indeks polarizacije (IP) i on pored apsolutnih vrednosti izolacionih otpornosti daje dodatnu informaciju o ovlaženosti izolacije. Zbog relativno dugotrajnog merenja, u praksi ispitivanja ET je uobičajeno da se merenje izolacione otpornosti ograniči na 60s i stoga se pored definisanog IP definiše i odnos vrednosti otpornosti nakon 60s i nakon 15s – koeficijent apsorpcije (N).

Merenje faktora dielektričnih gubitaka-tgδ i kapaciteta EIS namotaja ET obavlja se pri naizmeničnom ispitnom naponu, tipično do 12kVac, uz obavezu da nivo ispitnog napona ne prekorači vrednost naznačenog faznog napona ispitivanog namotaja. Merenje se obavlja mostovima za merenje tgδ i kapaciteta – Šeringovim ili transformatorskim (Glinovim) mostom ili savremenim dijagnostičkim mernim sistemima koji rade na principu preciznog vatmetara za merenje dielektričnih gubitaka. Merenje se tipično obavlja pri dva naponska nivoa radi utvrđivanja eventualne zavisnosti parametara izolacije od ispitnog napona, što dodatno govori o stanju izolacije.



S obzirom da su izolaciona otpornost i faktor dielektričnih gubitaka-tgδ jako zavisi od temperature EIS transformatora, poređenje njihovih izmerenih vrednosti sa prethodnim merenjima je moguće samo ako se izvrši svođenje na referentnu temperaturu, najčešće 20°C. Za potrebe korigovanja izmerenih parametara EIS – izolacionih otpornosti i faktora tgδ u literaturi postoje različiti empirijski dobijeni temperaturni koeficijenti [7] [8]. Zbog toga je veoma važno da se temperatura EIS prilikom ispitivanja što je moguće preciznije odredi, kako bi se pri naknadnim temperaturnim korekcijama pravila najmanja moguća greška i time najmanje uticalo na eventualnu pogrešnu procenu stanja EIS.

**Ispitivanje električnog izolacionog sistema uvodnih (provodnih) izolatora – merenje faktora dielektričnih gubitaka-tgδ i kapaciteta EIS PI** – Uvodni (provodni) izolatori su veoma važan deo ET, pri čemu kod distributivnih ET 110kV/x na strani namotaja 110kV najčešće postoje PI sa pristupačnim mernim priključkom, čime je omogućena PK izolacije samih PI. U praksi se pokazalo da je jedan od najčešćih kvarova na ET upravo uzrokovan oštećenjem i/ili ostarelošću izolacije PI. Izolacioni sistem PI naponskih nivoa 110kV i više je najčešće kondenzatorskog tipa sa uljno papirnom izolacijom, a u novije vreme sa smolom impregnisanom izolacijom i može se posmatrati kao redna veza kapaciteta čiji broj zavisi od broja provodnih obloga u njemu. Stanje EIS PI se kontroliše merenjem faktora dielektričnih gubitaka-tgδ i kapacitivnosti u mernoj šemi izolovanog objekta, ukoliko izolator ima merni priključak, ispitinim naponom do 12kVac, istovremeno kada i kontrola EIS namotaja, identičnom ispitnom opremom kojom se ispituje EIS namotaja ET. Ukoliko PI nema merni priključak, kontrola stanja EIS PI je praktično onemogućena.

Osetljiva tačka pri proceni stanja ostarelosti EIS PI ponovo je temperaturna zavisnost faktora dielektričnih gubitaka-tgδ EIS PI. Određivanje temperature izolacije PI je dodatno komplikovano, jer osim što zavisi od temperature gornjih slojeva ulja zavisi u većoj meri i od temperature ambijenta, jer se veći deo PI i nalazi pod uticajem temperature okolnog vazduha, dok je njegov manji deo uronjen u ulje transformatora, zato je važno beleženje obe temperature prilikom ispitivanja. Neki od proizvođača PI su za potrebe poređenja i korekcije izmerenih vrednosti na referentnu temperaturu empirijski došli do tablica i koeficijenata za temperaturnu korekciju vrednosti faktora tgδ [5].

Pored praćenja vrednosti faktora dielektričnih gubitaka-tgδ kao pokazatelja opšteg starenja EIS PI, takođe je veoma važno da se prati kapacitivnost izolacije PI. Kapacitivnost izolacije PI je pokazatelj stanja izolacije elementarnih obloga PI tako da se eventualni električni proboj između susednih obloga manifestuje porastom kapacitivnosti izolatora. Svaki proboj među oblogama povećava naponsko naprezanje preostalog "zdravog" dela PI, što sa svakim narednim prenaponskim talasom može da dovede do dodatnih proboja, u najgorem slučaju i do havarije-eksplozije PI.

**Merenje omskih otpornosti namotaja ET, uz kontrolu rada TRN merenjem otpornosti namotaja u svim položajima regulatora** – Metoda merenja omskih otpornosti je, uz merenje otpornosti izolacije, jedna od najstarijih metoda koja se koristi za ispitivanje ET. Ova metoda ispitivanja je obavezna pri prijemnim ispitivanjima ET u fabrici [1], čime se dobijaju referentne vrednosti za praćenje pri kasnijim ispitivanjima PK tokom eksploatacije ET. Primenom ove metode proverava se stanje namotaja, da li ima ozbiljnijih oštećenja-međuzavojnih spojeva ili eventualnih prekida namotaja, ali i stanje kontakata i spojeva na namotajima i njihovim međusobnim vezama ET. Većina ET u distributivnim postrojenjima imaju regulator napona koji može biti teretni, koji može da vrši prebacivanje položaja pod teretom što je gotovo redovan slučaj za ET 110kV/x ili besteretni, kod koga se manipulacija vrši isključivo u beznaponskom stanju, što je slučaj kod ET 35(10)kV/x. Pravilan rad i stanje kontakata regulatora napona se takođe proverava merenjem otpornosti namotaja u svim položajima regulatora.

Omska otpornost namotaja je takođe temperaturno zavisna tako da je pri merenju neophodno zabeležiti temperaturu transformatora, koja će kasnije poslužiti za svođenje na referentnu temperaturu radi poređenja.

**Merenje odnosa transformacije uz kontrolu sprege** – Merenje odnosa transformacije uz kontrolu sprege namotaja ET, pored merenja omskih otpornosti namotaja ET predstavlja jedno od prijemnih ispitivanja ET u fabrici [1] i stoga predstavlja jedan od parametara čija drastična promena gotovo uvek znači da je došlo do oštećenja izolacije i/ili namotaja ET usled vanrednog događaja u distributivnoj mreži – prenapona i/ili kratkog spoja praćenog velikim strujama kvara i jakim elektrodinamičkim silama koje su delovale na namotaje ET. Takav ET ne može da nastavi pogon. Stoga se merenje odnosa transformacije u principu ne radi u sklopu redovne PK, već samo u slučajevima kada se sumnja na drastično oštećenje na ET.

**Merenje struja i snaga praznog hoda pri sniženom naponu** – Predstavlja metodu koja je analogna ogledu praznog hoda koji se obavlja kao komadno prijemno ispitivanje ET u fabrici, s tim da se u terenskim uslovima obavlja pri sniženom naponu (monofazno do 220Vac ili trofazno do 3x380Vac) i ima za cilj praćenje stanja magnetnog kola odnosno eventualno prisustvo kratkospojenih zavojaka u namotaju ET. S obzirom da se ispitivanje vrši pri sniženom naponu, osetljivost ove metode je u izvesnoj meri ograničena, ali je dovoljna da ukaže na prisustvo kratko spojenih zavojaka i grubljih defekata u magnetnom kolu.

Radi budućeg poređenja, merenje struja i snaga pri sniženom naponu potrebno je obaviti u sklopu specijalnih prijemnih ispitivanja ET u fabrici. Merenje struja i snaga praznog hoda kod ET sa TRN obavlja se pri srednjem i dva krajnja položaja regulatora.

**Merenje impedanse kratkog spoja, odnosno induktivnosti usled rasipanja pri sniženom naponu** – Tokom normalnog pogona, namotaji ET trpe stalna mehanička naprezanja usled vibracija i elektrodinamičkih sila, koje su posledica normalnih pogonskih struja, koje rastresaju namotaj i slabe njegovu mehaničku čvrstoću. Međutim, mnogo su opasnija i višestruko jača mehanička naprezanja usled elektrodinamičkih sila kojima su izloženi namotaji ET pri vanrednim događajima u mreži – bliskim kratkim spojevima. Ova naprezanja mogu da izazovu plastične deformacije namotaja, time da naruše sigurnosne razmake između zavojaka i/ili pojedinih slojeva namotaja, imaju kumulativni efekat i svako naprezanje pri narednom bliskom kratkom spoju može da dovede do kratkog spoja u namotaju i do havarije.

Induktivnost usled rasipanja je parametar koji je u velikoj meri definisan geometrijom namotaja, te je time moguće praćenje stanje geometrije namotaja tokom pogona, a posebno eventualne promene nakon pojave bliskog kratkog spoja. Merenje induktivnosti usled rasipanja analogno je ogledu kratkog spoja koji se obavlja kao komadno prijemno ispitivanje ET u fabrici, samo što se obavlja pri sniženom naponu. Metoda je, kao i većina električnih metoda PK, poredbena i stoga zatheva referentnu vrednost. U nedostatku referentnih vrednosti, poređenje i dijagnostiku je moguće obaviti na osnovu računskih vrednosti impedanse kratkog spoja, odnosno induktivnosti usled rasipanja dobijenih iz tabličnog podatka relativnog napona kratkog spoja. Kod ET sa TRN merenje se obavlja pri srednjem i dva krajnja položaja regulatora.

**Snimanje frekventnog odziva namotaja ET (metode SFRA, FRA)** – Namotaj ET se, sa gledišta ponašanja u širem frekventnom opsegu, može da predstavi slično kابلu, odnosno kao objekat se raspodeljenim električnim parametrima – podužnom otpornošću, kapacitivnošću i induktivnošću.

Kada se takav objekat izloži naizmjeničnom naponu u širokom frekventnom opsegu, tipično od reda 10Hz do reda MHz dobija se frekventna karakteristika namotaja sa više rezonantnih učestanosti, kao odnos primenjenog napona na jednom i njegovog odziva na drugom kraju namotaja. Rezonantne učestanosti određene su podužnim parametrima namotaja, koje zavise od dimenzija namotaja i međuzavojnih razmaka – geometrija namotaja, prelaznim otpornostima kontakata i karakteristikama ulja. Svaka promena geometrije i/ili deformacija namotaja izazvaće pomeranje rezonantnih učestanosti u horizontalnom smeru ili pojavu novih rezonantnih učestanosti. Metoda je komplementarna sa klasičnom metodom merenja induktivnosti usled rasipanja, merne sprege su praktično iste i za kvalitetnu dijagnostiku je potrebno početno (referentno) snimanje, ali je u nedostatku referentnih odziva moguće poređenje sa odzivima dobijenim sa jedinice istog tipa.

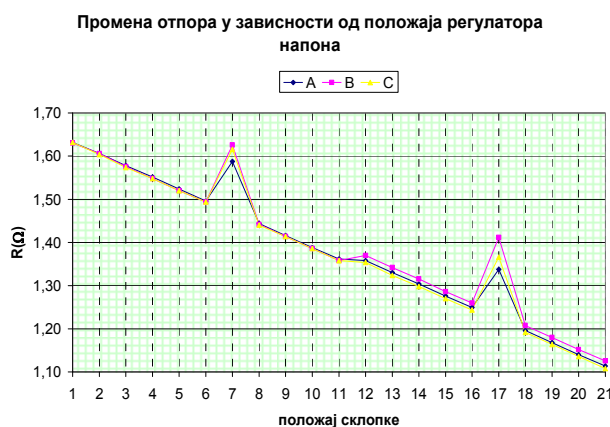
**Određivanje sadržaja vlage u čvrstom delu uljno-papirne izolacije – metoda frekventno zavisne spektroskopije (FDS), metoda merenja povratnog napona (RVM), merenje struja polarizacije-depolarizacije (PDC)** – Električne metode kojima se određuje sadržaj prevashodno vlage, ali i drugih polarnih produkata starenja uljno-papirne izolacije su novijeg datuma i zasnovane su: na merenju

povratnog napona pri periodičnom režimu punjenja-pražnjenja izolacije-metoda RVM, merenju promene struja punjenja/pražnjenja kroz uljno-papirnu izolaciju kada se ista izloži delovanju jednosmernog ispitnog napona-metoda PDC ili posmatranju frekventne zavisnosti parametara izolacije (faktora dielektričnih gubitaka-tgδ) u zavisnosti od naizmeničnog ispitnog napona u širokom opsegu učestanosti od reda nekoliko kHz do vrlo niskih učestanosti reda 100mHz-metoda FDS. Sve tri metode određivanja sadržaja vlage su zasnovane na empirijski definisanim modelima, većina su u značajnoj meri temperaturno zavisne.

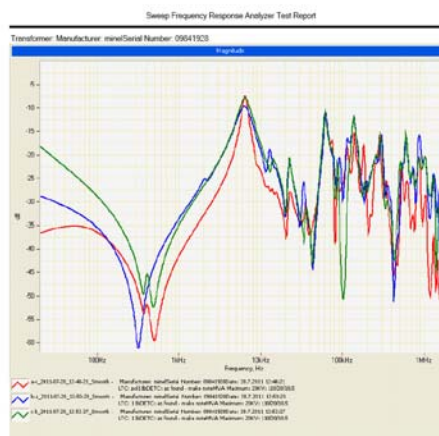
## PRIMERI IZ PRAKSE

### 1. Primer: ET 20MVA, 110/20/10kV u distributivnoj TS – uvećane omske otpornosti namotaja

Redovnim električnim ispitivanjem iz domena PK - merenjem omskih otpornosti, na strani namotaja 110kV u svim položajima TRN, utvrđeno je odstupanje u dva simetrična položaja regulatora (7 i 17) koja su posledica oštećenja odgovarajućih kontakata (slika 2). Na priloženom frekventnom odzivu (slika 3) takođe se može videti uticaj značajno uvećanog prelaznog otpora.



SLIKA 2 - Promena otpornosti sa položajem TRN



SLIKA 3 - Prikaz frekventnog odziva

Pored uvećanih prelaznih otpornosti na kontaktima 7 i 17 na strani 110kV, utvrđene su izrazito velika odstupanja – uvećani prelazni otporni na spojevima namotaja tercijera 10,5kV, što se može videti u tabeli 2:

TABELA 2 - Rezultati merenja otpornosti namotaja tercijera 10kV

zatvoreni trougao				otvoreni trougao			
R (mΩ)			δR	R (mΩ)			δR
a – b	a – c	b – c	(%)	a – x	b – y	c – z	(%)
32,56	<u>48,56</u>	31,74	<u>53,0</u>	<u>70,80</u>	39,28	39,26	<u>80,3</u>

Analizom izmerenih vrednosti otpornosti, utvrđeno je da je uvećanje uzrokovano oslabljenim spojem na priključku izolatora "x". Predmetni ET je zbog potreba sistema ipak ostao u pogonu, ali u režimu znatno nižeg opterećenja.

Redovnom GH analizom (05/10/2011) nije utvrđen značajan porast koncentracija gasova termičkog kvara koje bi ukazivale na pregrevanje kontakata, odnosno spojeva (tabela 3).

TABELA 3 – Rezultati redovne analize rastvorenih gasova u ulju metodom GH

Datum uzorkovanja	Tu °C	N	Ug ml <sub>gas</sub> /l <sub>ulja</sub>	POJEDINAČNE KONCENTRACIJE GASOVA, ppm									Int
				H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
14/04/2008	45	D	89.6	2	6	0	20	2	140	1099	25242	64259	A
05/10/2011	53	D	85.6	0	4	1	20	3	140	1130	25364	58911	A
27/03/2012	/	D	90.7	7	17	2	54	7	113	1032	26042	63394	B

U ovakvim slučajevima, metoda GH nije dovoljno osetljiva da može da otkrije termički kvar koji je u začetku. Razlog za to leži u činjenici da je relativno mala površina zahvaćena pregrevanjem, odnosno da je i mala zapremina ulja izložena pregrevanju, te je i produkcija termičkih gasova pri radnom opterećenju, nedovoljna da ukaže na probleme termičke prirode. Nivo opterećenja ET 110kV/x u distributivnim TS često ne prelazi 50% što u ovakvim slučajevima dodatno komplikuje dijagnostiku preko GH analize. U takvim slučajevima pravovremena električna ispitivanja mogu da dopune i najčešće poprave ocenu stanja ET.

## 2. Primer: ET 31,5MVA, 110/36,75/10kV u distributivnoj TS – izolatori sa visokim faktorom dielektričnih gubitaka.

Nakon ispitivanja u 2010. godini pri rutinskoj preventivnoj kontroli ET utvrđeno je da dva izolatora imaju izrazito visoke vrednosti faktora dielektričnih gubitaka (tabela 4). Primetan je porast vrednosti tgδ koji je karakterističan za izolaciju PI koja je ovlažena ili sa značajno prisutnim produktima starenja. Redovnom GH analizom u ovom slučaju nije moguće utvrditi postojanje problema na PI, jer se GH analiza vrši na uzorku ulja iz glavnog suda ET.

U ovakvim situacijama dalji pogon je skupčan sa rizikom i preporučuje se zamena izolatora. Međutim, zbog nedostatka rezervnih izolatora nije bilo moguće izvršiti zamenu već je pogon nastavljen.

TABELA 4 - Rezultati ispitivanja EIS PI 110kV

faza	U <sub>isp</sub> (kV)	2010.		2011.	
		tgδ (%)	C (pF)	tgδ (%)	C (pF)
A	5	2,72	206,04	4,27	206,88
	10	3,13	206,13	4,96	206,97
B	5	0,28	201,25	0,27	201,25
	10	0,28	201,21	0,29	201,21
C	5	3,41	206,43	4,38	208,82
	10	3,98	206,55	3,98	208,86
N	5	0,25	207,50	0,25	207,54
	10	0,25	207,48	0,25	207,50

Nakon ponovljenog ispitivanja u 2011. godini, pri približno istim temperaturnim uslovima, utvrđeno je pogoršanje – porast vrednosti faktora gubitaka, koji je praćen porastom kapaciteta, tako da je predmetni ET isključen iz pogona do zamene izolatora.

Dalji rad ovakvog ET bi verovatno izazvao havariju tipa eksplozije PI te je na ovaj način pravovremenom PK ista sprečena.

## 3. Primer: Ispada ET 31,5MVA, 110/10,5/10kV reagovanjem gasnog relea TRN.

Redovnom GH analizom (tabela 5), ET je svrstan u sumnjive usled porasta koncentracija acetilena u glavnog suda (24/06/2008) i sumnje na problema u TRN, te je preporučena revizije TRN. Ista nije obavljena na vreme, već je u nastavku pogona, nakon 6 meseci, došlo do ispada ET po gasnom releu TRN (06/12/2008).

TABELA 5 – Rezultati redovne analize rastvorenih gasova u ulju metodom GH

Datum uzorkovanja	Tu °C	N	U <sub>g</sub> ml <sub>gas</sub> /l <sub>ulja</sub>	POJEDINAČNE KONCENTRACIJE GASOVA, ppm									Int
				H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
03/11/2004	42	D	90.8	21	9	88	53	8	295	2388	24287	/	A
<b>24/06/2008</b>	<b>68</b>	<b>D</b>	<b>91.5</b>	<b>39</b>	<b>12</b>	<b>197</b>	<b>79</b>	<b>6</b>	<b>334</b>	<b>2739</b>	<b>18081</b>	<b>73670</b>	<b>B102</b>
<b>06/12/2008</b>	<b>34</b>	<b>D</b>	<b>85.9</b>	<b>29</b>	<b>23</b>	<b>221</b>	<b>98</b>	<b>13</b>	<b>261</b>	<b>24251</b>	<b>24251</b>	<b>58872</b>	<b>B102</b>
<b>06/12/2008</b>	<b>/</b>	<b>RN</b>	<b>132.3</b>	<b>11077</b>	<b>5233</b>	<b>49261</b>	<b>12389</b>	<b>2245</b>	<b>205</b>	<b>2532</b>	<b>14469</b>	<b>34838</b>	<b>C</b>
29/12/2008	40	D	86.6	18	14	174	83	7	212	1947	24459	59659	B102
27/05/2009	52	S	88.7	7	2	71	62	6	224	2376	25499	30320	A
05/10/2010	32	/	92.6	17	10	49	58	6	304	2180	24441	65501	A

Nakon prorade gasnog relea TRN i ispada ET, hitno je obavljeno vanredno električno ispitivanje radi utvrđivanja mesta kvara i utvrđen je nepravilan rad TRN. Normalan rad TRN podrazumeva kontinuitet radne struje tokom cele sekvence prebacivanja iz jednog položaja u drugi. Kod predmetnog TRN je tokom dijagnostičkog ispitivanja-merjenja omskih otpornosti utvrđeno da prilikom prebacivanja-



manipulacije dolazi do prekidanja radne struje, što je u pogonu uzrokovalo veliku produkciju gasova i proradu gasnog relea. Prekidanje radne struje tokom sekvence prebacivanja položaja značilo je da je došlo do oštećenja u prekidačkom delu TRN. Na licu mesta TRN je otvoren i utvrđen je prekid veze između otpornika za ograničenje struje pri prebacivanju u prekidačkom delu, što se može videti na slici 4. Nakon popravke i zamene provodnika (slika 5), pri ponovljenom merenju omskih otpornosti potvrđen je normalan rad teretnog regulatora i ET je u najkraćem roku vraćen u pogon.



SLIKA 4 - Prikaz prakidačkog dela TRN sa mestom pregorevanja provodnika



SLIKA 5 - Prikaz prakidačkog dela TRN nakon popravke

#### 4. Primer: Dva slučaja ET u pogonu distribucije kod kojih su rezultati GH analize ukazivali na toplotni kvar, što je potvrđeno električnim ispitivanjima

Prvi slučaj je ET-1 35/10kV, 8MVA na kome je gasnom hromatografijom utvrđeno prisustvo gasova karakterističnih za toplotni kvar sa temperaturama preko 700°C – šifra C022 (tabela 6). U cilju jasnije dijagnostike na predmetnom ET obavljeno je kompletno ispitivanje EIS.

Svi rezultati električnih ispitivanja bili su zadovoljavajući, osim rezultata merenja omskih otpora namotaja 35kV, koji su znatno odstupali od preporučenog kriterijuma. Maksimalna međufazna razlika od 16,89% ukazivala je na mogući povećan prelazni otpor usled oštećenja/pregorevanja kontakta regulatora u fazi "C". Predmetni transformator je otvoren u remontoj radionici i utvrđeno je da je kontakt regulatora u pomenutoj fazi u značajnoj meri oštećen, sa prisutnim tragovima grejanja.

TABELA 6 – Prikaz rezultata kontrole GH na ET 35/10kV

ET	Pojedinačne koncentracije gasova kvara (ppm)								
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
ET-1	0	50	1	1204	755	84	1343	28113	63902
ET-2	193	675	30	2475	335	269	2860	23801	60001

Drugi slučaj je na ET-2 35/10kV, 4MVA koji je takođe ocenjen kao neispravan zbog prisustva gasova toplotnog kvara – šifra C022. Prilikom dijagnostičkog ispitivanja izmerene vrednosti omskih otpornosti uz međufazno odstupanje preko 10% u položaju besteretnog regulatora 3, u kome ET i inače radi. Nakon vizuelnog pregleda uvrđeno je pregorevanje kontakata i besteretni regulator je zamenjen.

#### SPECIFIČNOSTI VEZANE ZA ISPITIVANJE I ODRŽAVANJE ET 110kV/x

ET naznačenog napona 110kV/x u distributivnim TS po pravilu, na strani 110kV imaju PI sa pristupačnim mernim priključkom, tako da je moguće nezavisno ispitivanje stanje izolacije PI od stanja EIS namotaja. Pored ispitivanja EIS izolatora, posebna pažnja se treba posvetiti i stanju i funkcionalnosti odvodnika prenapona 110kV, jer u slučaju da odvodnici nisu dobro podešeni ili ne rade kako treba prvi na udaru prenapona su upravo PI što može da dovde do probijanja elementarnih obloga i do oštećenja PI.

Druga specifičnost je postojanje TRN, za razliku od besteretnog menjača kod ET 35kV/x, mada je praksa pokazala da su i besteretni menjači često slabo mesto i najčešći uzrok pojave pregrevanja i gasova toplotnog kvara kod ET 35kV/x. Pored merenja omskih otpornosti u svim položajima TRN, u novije vreme se u slučajevima sumnje na nepravilan rad TRN, preporučuje GH analiza uzoraka ulja uzetih iz samog TRN, ako je to tehnički izvodljivo. Tumačenjem rezultata GH analize ulja iz TRN moguće je utvrditi uvećano prisustvo termičkih gasova u odnosu na gasove električnog luka, koje mogu da ukažu na pregrevanje kontakata prekidačkog dela TRN.



Treća specifičnost predstavlja činjenica da je, zbog naponskog nivoa, mesta i uloge u distributivnoj mreži, eventualni ispad ET naznačenog napona 110kV/x znatno skuplji u odnosu na troškove ispitivanja PK i stoga obim ispitivanja treba da bude proširen u odnosu na ET 35kV/x, odnosno da se pri planiranju obima ispitivanja polazi od principa tehničke opravdanost. Mada u nekim situacijama i ET 35kV/x, u slučaju izrazite važnosti, trebe tretirati podjednako kao i ET 110kV/x.

## ZAKLJUČAK

Iz navedenih nekoliko primera iz prakse PK distributivnih ET 110kV/x, ali i transformatora 35kV/x, kao i iz još mnoštva primera koji zbog obimnosti nisu mogli biti navedeni u ovom radu, potvrđena je opravdanost sveobuhvatnog i objedinjenog pristupa PK, posebno ET 110kV/x. Počevši od pravovremenog uzorkovanja i hemijske analize ulja, sa posebnim naglaskom na GH, čiji rezultati mogu da pomognu i da odrede obim električnih ispitivanja, preko analize rezultata termovizije, kao još jedne on-line metode ispitivanja, do izvođenja električnih ispitivanja i konačne analize svih obavljenih ispitivanja dolazi se do realne i pouzdane procene stanja pogonskog stanja ET i pravovremenog sprečavanja eventualnih predhvarijskih i havarijskih stanja.

## LITERATURA

1. IEC60076-1 Power Transformers – Part 1: General
2. Pravilnik o održavanju elektroenergetskih postrojenja prenosne mreže Jugoslavije GSE 78/91, ZJE, Beograd, 1991.
3. Pravilnik o održavanju distributivnog elektroenergetskog sistema, EPS, JP "Elektrosrbija"Kraljevo, 2002.
4. Godišnji izveštaj o preventivnoj kontroli energetske i mernih transformatora za PD Elektrosrbija, 2009, 2010, 2011
5. Service Handbook for Transformers, ABB, Zurich, 2008.
6. Interni standard EPS – Energetski transformatori u pogonu, Beograd, 2011. (u izradi)
7. Obim i normi ispitivanja elektrooborudovanja, RD 34.45-51.300-97, Moskva, 2004.
8. IEEE Std 62-1995 (R2005) IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Power Apparatus - Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors

## SPECIFICITIES AND PRACTICAL EXPERIENCES OF ELEKTRICAL TESTING OF POWER TRANSFORMERS 110kV/x IN DISTRIBUTIVE SUBSTATIONS

**Abstract:** The practical experiences of electrical testing as a part of preventive control of power transformers 110kV/x in transformer stations on electrical power distribution companies are presented in this paper. The scope and description of electrical tests which are in practice of preventive testing in the Laboratory for insulation systems in the Institute "Nikola Tesla" and some case studies are also given. In this paper, authors tend to emphasize the advantage of complex interpretation of insulation oil testing results, especially results of gas chromatography (DGA), water and furanic compound content, dielectric strength of oil and all performed electrical tests in order to get a reliable estimation of the present operation condition. The estimation of the readiness of tested distributive power transformer for continuation of service or recommendation for maintenance interventions which are needed to prevent possible failure are based on that. The suggested approach means close cooperation both electrical and chemical-technology engineers. This paper also has been pointed to some differency in the maintenance of distributive power transformers 110kV/x in the respect of distributive power transformers 35kV/x, due to presence of the bushings rated voltage 110kV, on-load tap changers (OLTC) and 110kV voltage arresters.

**Key words:** power transformer, insulation, insulation oil, preventive control, DGA, OLTC, preventive maintenance, condition assessment.