

PRAKTIČNA ISKUSTVA PRILIKOM ISPITIVANJA ELEKTRIČNOG IZOLACIONOG SISTEMA PROLAZNIH IZOLATORA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA NA TERENU

M. MILIĆ^{1,2}
D. ILIĆ^{1,2}
LJ. NIKOLIĆ¹
Đ. JOVANOVIĆ¹
B. PEJOVIĆ¹
R. PARTONJIĆ^{1,2}

¹ Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

² Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Za pravilan i pouzdan rad elektrodistributivnih mreža neophodno je da sve komponente istih funkcionišu na način koji obezbeđuje siguran prenos i distribuciju električne energije. Upravo iz tog razloga, kao prioritet, se nameće pitanje strategije održavanja komponenti elektrodistributivnih mreža. Energetski transformatori, kao elementi bez čije uloge ne bi mogao ni da se zamisli rad čitavog sistema, zauzimaju posebno mesto, a njihov monitoring i dijagnostika bitan faktor u održavanju stabilnosti elektrodistributivnih mreža. Prolazni (uvodni) izolatori su izuzetno važan deo svakog energetskog transformatora s obzirom da pogonska spremnost transformatora direktno zavisi od njihove ispravnosti. Iz tog razloga, prilikom ispitivanja energetskih transformatora, prolaznim izolatorima se poklanja dodatna pažnja. Naime, stanje električnog izolacionog sistema ovih izolatora je moguće kontrolisati merenjem faktora dielektričnih gubitaka ($tg\delta$) i kapacitivnosti, kao i otpornosti izolacije izolatora u za to predviđenim vremenskim intervalima. Pojedine, uglavnom moderne, konstrukcije uvodnih izolatora poseduju priključak za navedena merenja, dok je kod starijih konstrukcija to retkost. U slučaju defekta i eventualnog proboja izolatora, transformator bi pored ispada iz pogona mogao da pretrpi i značajna oštećenja. Pri tome, treba uzeti u obzir da u slučaju eksplozije izolatora, moguće je oštetiti i opremu koja se fizički nalazi u blizini defektnog izolatora. Stoga, pouzdan uvid u stanje električnog izolacionog sistema prolaznih izolatora obezbeđuje pravovremeno planiranje zamene istih u cilju bezbednog rada transformatora. U radu su prikazana iskustva prilikom ispitivanja električnog izolacionog sistema izolatora kao deo mera preventivne kontrole energetskih transformatora. Pored ilustracije same konstrukcije, karakteristika prolaznih izolatora, metode za ispitivanje istih, u radu će biti interpretirani rezultati merenja i pomenute specifične i neuobičajene situacije koje su imale uticaja na tačnost, odnosno verodostojnost dobijenih rezultata merenja.

Ključne reči: Elektrodistributivne mreže – Energetski transformator – Prolazni izolatori – Ispitivanje električnog izolacionog sistema

SUMMARY

Proper and reliable operation of a power distribution network is conditioned by the fact that all components need to function in a manner which ensures secure transmission and distribution of electricity. That's the reason why choosing the right strategy for maintaining the power distribution network components has a priority. Power transformers as key elements without whose role couldn't even imagine the work of the entire system occupy a special place and therefore their monitoring and diagnostics are maybe the most significant factor in maintaining the stability of power distribution networks. Bushings are an extremely important part of any power transformer with respect to operational readiness of the transformer is directly dependent on their validity. That's the reason why during the power transformers examining an extra attention is given to bushings. The condition of electrical insulation system of bushings can be controlled by measurement of the dielectric dissipation factor ($tg\delta$) and capacitance as well as the insulation resistance at the specified time intervals. Some, mostly modern, bushing constructions have access to specified measurement, while for older ones that's rarity. In the event of bushing defect or a possible fault, in addition to the outage the transformer could suffer significant damage. It should be taken into account that in case of the bushing explosion there could be damage to the equipment that is in the vicinity of the defective bushing. Hence, reliable insight into the state of bushing's electrical insulation system

provides their replacement at the right time in order to secure safe operation of the transformer. This paper presents experiences collected by testing bushing's electrical insulation system as a part of preventive control measures of power transformers. In addition to the illustration of the bushings construction and behavior, methods for their testing, the results of measurements and also some specific and unusual situations that had an impact on the accuracy or credibility of the obtained measurement results will be interpreted in this paper.

Key words: Power Distribution Network - Power transformer - Bushings – Electrical Insulation System Measurements

UVOD

U cilju pravilnog i pouzdanog rada elektrodistributivnih mreža neophodno je da sve njihove komponente funkcionišu na način koji obezbeđuje siguran i pouzdan prenos i distribuciju električne energije. Stoga se, kao prioritet, nameće pitanje važnosti optimalnog održavanja komponenti elektrodistributivnih mreža. Energetski transformator (ET), kao ključni element prenosnog i distributivnog sistema, zauzima posebno mesto u strategiji očuvanja pouzdanosti i stabilnosti kako proizvodnog tako i prenosnog i distributivnog dela elektroenergetskog sistema. Svrha preventivne kontrole ET, koja se sastoji od redovnih kontrolnih ispitivanja i merenja pojedinih karakterističnih veličina električnog izolacionog sistema (EIS) namotaja i magnetnog kola, je praćenje njegovog pogonskog stanja, otkrivanje eventualnog defekta (kvara) i pravovremeno sprečavanje havarije na njima. Kako se ET nalaze u svakoj od karika lanca proizvodnja-prenos-distribucija električne energije, preventivna ispitivanja osiguravaju blagovremeno planiranje servisno-korektivnih akcija čime daju značajan doprinos povećanju pouzdanosti proizvodnje, prenosa i distribucije električne energije, a samim tim i sigurnost snabdevanja konzuma, od domaćinstava do industrije. Naime, bilo kakav kvar na transformatoru, pored toga što iziskuje značajno vreme za eventualnu popravku i troškove popravke, proizvodi i dodatne troškove usled neisporučene električne energije potrošačima koji mogu premašiti troškove otklanjanja kvara. Tome se mogu pridodati i eventualni troškovi nastali usled oštećenja okolne opreme usled npr. eksplozije prolaznih izolatora (PI). Stoga, mogućnost planiranja servisnih radnji u najpovoljnijem trenutku, posmatrano sa tehnokonomske tačke gledišta, obezbeđuje značajne finansijske uštede, naročito u uslovima modernog deregulisanog tržišta.

Visokonaponski (VN) prolazni (provodni, uvodni) izolatori predstavljaju nezaobilazne delove svakog ET. Ovde se prvenstveno misli na visokonaponske PI distributivnih transformatora naznačenog napona 110 kV. S obzirom na uobičajnu konstrukciju transformatora i VN postrojenja, pod pojmom „prolaznog izolatora ET“ se uglavnom podrazumevaju izolatori koji su konstruisani za prelaz ulje-vazduh, premda se u novije vreme mogu sve češće sresti izolatori ulje-SF₆. Njihova osnovna funkcija je da omoguće izvod visokonaponskih namotaja faza transformatora iz kućišta transformatora i pri tome omoguće dovoljnu električnu izolovanost tog izvoda. Pri tome, moraju izdržati i normalna strujna opterećenja u nivou nominalne struje namotaja. Takođe, tokom životnog veka, PI su izloženi raznim nepovoljnim atmosferskim uslovima, koji dodatno mogu ugroziti njihovu pogonsku spremnost (sneg, led, kisele kiše, soli(naročito u primorskim krajevima), prašina...).

Između 10 % i 20 % kvarova ET uzrokovano je oštećenjima, odnosno defektima VN prolaznih izolatora, pri čemu treba istaći da kvar na PI direktno utiče na pogonsku spremnost ET. Ovaj procenat se mora uzeti sa rezervom, imajući u vidu da je to procentualni udeo u svim kvarovima ET, a da se uz to može primetiti značajan broj uočenih degradiranih PI, koji su blagovremeno zamenjeni, te je dalji razvoj kvara PI i eventualni ispad ET sprečen. Pored visokonaponskih PI, koji su sa kondenzatorskim telom, na distributivnim ET postoje i sredjenaponski (SN) PI koji su najčešće sa keramičkim telom i bez kapacitivnih obloga koje nisu potrebne s obzirom na niže naznačene napone. Za njihov pravilan rad neophodno je da površine keramičkog tela budu bez oštećenja, naprsina i čiste (bez površinskih naslaga i nečistoća).

Prema tome, redovna dijagnostička ispitivanja visokonaponskih PI su od suštinskog značaja za normalan rad ET, pri čemu treba naglasiti da se preventivna merenja obavljaju u *off-line* režimu, odnosno u beznaponskom stanju, a prema standardizovanim metodama i odgovarajućom mernom opremom. Cilj dijagnostičkih ispitivanja je dobijanje podataka o određenim karakteristikama izolacionog sistema PI. Rezultati izvršenih merenja omogućavaju da se izvrši procena, odnosno dijagnostika stanja PI, kao i dalje praćenje trenda karakteristika PI (poređenjem sa rezultatima prethodnih ispitivanja), koje mogu da ukažu na eventualno nezadovoljavajuće stanje. Na taj način može na vreme da se izvrši odgovarajuća popravka ili eventualna zamena izolatora. Time se doprinosi prevenciji potencijalnih kvarova koji mogu dovesti do havarija. (Slika 1). Havarije mogu biti izazvane upravo eksplozijom PI, pri čemu najčešće dolazi do požara i uništenja celokupnog transformatora, kao i oštećenja okolne opreme (odvodnika, strujnih transformatora, potpornih izolatora, šinskih veza i sl.).

Iskustva stečena pri terenskim profilaktičkim ispitivanjima u mnogome doprinose proširivanju postojećeg znanja. Ponekad se iz specifičnih situacija koje direktno utiču na rezultate merenja izlazi sa posebnim saznanjem i iskustvom od kojih će slično biti opisano i u radu.



Slika 1: Prikaz havariisanog energetskog transformatora kao posledice eksplozije PI

ISPITIVANJE ELEKTRIČNOG IZOLAZIONOG SISTEMA PROLAZNIH IZOLATORA MERENJEM FAKTORA DIELEKTRIČNIH GUBITAKA ($\text{tg}\delta$) I KAPACITETA (C)

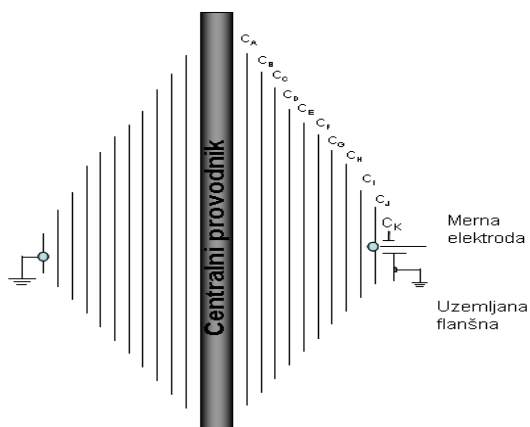
Merenje faktora dielektričnih gubitaka ($\text{tg}\delta$) i kapaciteta (C) EIS prolaznih izolatora je jedna od osnovnih metoda u dijagnostici stanja energetskih transformatora i kao takva koristi se dugi niz godina u okviru fabričkih i preventivnih ispitivanja ET. Metodom se mogu otkriti električni kvarovi u EIS prolaznih izolatora, ali je u suštini poredbena metoda i služi za praćenje, odnosno trend analizu stanja PI u cilju donošenja pravovremene odluke popravke ili zamene istih.

Kako je već rečeno, PI su važan deo svakog transformatora jer od njihove ispravnosti zavisi ispravnost i pogonska spremnost samog transformatora. Električni izolacioni sistem PI viših naponskih nivoa je najčešće kondenzatorskog tipa sa uljno-papirnom izolacijom (*Oil Impregnated Paper – OIP*), a u novije vreme sa smolom impregnisanom papirnom izolacijom (*Resin Impregnated Paper – RIP*). Izveden je u vidu koncentričnih slojeva tanke aluminijumske folije koja je izolovana uljem i smolom impregnisanim papirom i može se posmatrati kao redna veza ekvivalentnih kapaciteta čiji broj zavisi od broja provodnih obloga u njemu (Slika 2). Na taj način omogućeno je da se centralni provodnik na visokom potencijalu "provede" kroz uzemljen poklopac transformatorskog suda. Broj elementarnih kapaciteta, odnosno slojeva zavisi od naznačenog napona izolatora i dat je u tabeli 1 [1].

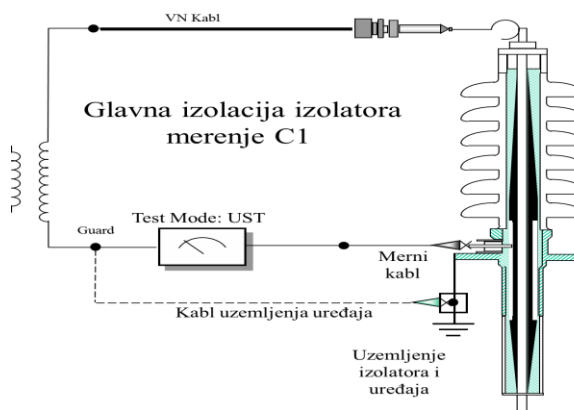
TABELA 1 – Određivanje broja elementarnih kapaciteta u zavisnosti od naznačenog napona

U_n [kV]	Broj elementarnih kapaciteta (slojeva) (n)
123	28
245	42
420	60

Dakle, osnovna izolacija PI se gradi od slojeva papir-provodna folija –papir. Električni probij između susednih obloga manifestuje se porastom kapaciteta izolatora. Stanje EIS prolaznog izolatora, kao potpuno zasebnog elementa ET, moguće je kontrolisati ukoliko izolator ima merni priključak, odnosno električni kontakt sa poslednjom oblogom kapacitivnog lanca (*Test tap*), merenjem faktora dielektričnih gubitaka $\text{tg}\delta$ i kapaciteta u mernoj šemi "izolovani objekat" (*Ungrounded Specimen Test - UST*) (Slika 3). Tipovi mernih priključaka su različiti za različite proizvođače, ali je svima zajedničko da merni priključak, odnosno poslednja obloga kapacitivnog delitelja tokom pogona bude čvrsto uzemljena. U protivnom, na neuzemljenom mernom priključku tokom pogona može doći do varničenja jer se visok napon sa centralnog provodnika preko redne veze kapaciteta direktno prenosi na merni priključak čija izolacija podnosi napone maksimalno 2 kV. Dugotrajno varničenje može da dovede do havarije i eksplozije PI.



Slika 2: Prolazni izolator kondenzatorskog tipa sa mernim priključkom



Slika 3: Merna šema "izolovani objekat" (UST)

Merni uređaji pomoću kojih se vrši ispitivanje EIS prolaznih izolatora u današnje vreme su automatizovani, računarski kontrolisani, u sebi često sadrže i napojnu i mernu jedinicu, bezbednosne tastere i trepćuća svetla opomene prisustva opasnog visokog napona, specijalno su prilagođeni, precizni i pouzdani za terenske uslove rada na mestu ugradnje transformatora gde je često izražen uticaj elektromagnetnih smetnji.

Analiza rezultata i dinamika ispitivanja prolaznih izolatora

U raznim tehničkim preporukama definisane su preporučene kriterijumske vrednosti za faktor dielektričnih gubitaka – $\text{tg}\delta$ električnog izolacionog sistema PI u zavisnosti od naznačenog napona. Ovi orijentacioni kriterijumi se u određenoj meri razlikuju od tipa do tipa izolatora i dosta zavise od proizvođača, a naročito od konstrukcije i vrste izolacionog sistema, odnosno da li se radi o uljem impregnisanom papirnoj izolaciji ili izolaciji impregnisanom smolom.

Pre svega potrebno je istaći da su dielektrični gubici većine izolacionih materijala po prirodi zavisni od promene temperature, pri čemu osetljivost na temperaturu zavisi od upotrebljenog izolacionog materijala. Analiza rezultata radi procene trenda podrazumeva poređenje izmerenih vrednosti parametara EIS izolatora koji su dobijeni pri ispitivanjima u različitim temperaturnim uslovima. Upravo iz tog razloga su potrebni temperaturni koeficijenti za svodjenje na referentnu temperaturu. Oni se najčešće dobijaju empirijski i daju ih sami proizvođači ili su rezultat istraživanja i studija koje su izvele same laboratorije i ustanove (instituti) koje se bave ispitivanjima elektroenergetske opreme. Isto tako, od strane proizvođača, daju se i fabričke vrednosti faktora dielektričnih gubitaka i kriterijumi za procenu stanja. U tabelama 2 i 3 kao primer su date preporuke za procenu stanja PI prema izmerenim vrednostima faktora dielektričnih gubitaka- $\text{tg}\delta$ odnosno kapaciteta glavne izolacije C_1 [2] jedne renomirane firme koja se bavi proizvodnjom ispitne opreme, ali i terenskim ispitivanjima:

TABELA 2 – Procena stanja PI prema izmerenoj vrednosti faktora dielektričnih gubitaka

kriterijum po izmerenom $\text{tg}\delta$ PI	stanje PI
$\text{tg}\delta_{\text{tablično}} < \text{tg}\delta \leq 2 \times \text{tg}\delta_{\text{tablično}}$	zadovoljavajuće
$2 \times \text{tg}\delta_{\text{tablično}} < \text{tg}\delta \leq 3 \times \text{tg}\delta_{\text{tablično}}$	pooštrena kontrola
$3 \times \text{tg}\delta_{\text{tablično}} < \text{tg}\delta$	zameniti PI

TABELA 3 – Procena stanja PI prema izmerenoj vrednosti kapaciteta glavne izolacije

kriterijum po izmerenom C_1 PI, odnosno razlici u odnosu na tabličnu vrednost $\delta C_1 = (C_1 - C_{\text{tablično}}) / C_{\text{tablično}}$	stanje PI
$\delta C_1 \leq \pm 5 \%$	zadovoljavajuće
$\pm 5 \% < \delta C_1 \leq 10 \%$	pooštrena kontrola
$\delta C_1 > \pm 10 \%$	zameniti PI

gde su $\text{tg}\delta_{\text{tablično}}$, $C_{\text{tablično}}$ – tablične (referentne) vrednosti parametara EIS izolatora koje su dobijene pri fabričkim prijemnim ispitivanjima, najčešće pri temperaturama bliskim referentnoj od 20°C, koje su utisnute na natpisnoj pločici PI i sa kojim PI ulazi u pogon.

Prilikom merenja $\text{tg}\delta$, upravo zbog variranja temperature, postoji procedura koja se sastoji iz sledećih koraka:

1. Izvrši se merenje $\text{tg}\delta$ i kapaciteta PI,
2. Odredi se (proceni) temperatura PI,
3. Pronađe se potrebni korekcionni faktor koji odgovara temperaturi PI,

4. Vrednost $tg\delta$ svedena na referentnu temperaturu (20°C) dobija se množenjem izmerene vrednosti $tg\delta$ i odgovarajućeg korekcionog faktora.

Greška će biti manja ukoliko se merenja vrše na temperaturama približnim referentnoj. U slučaju da se ispitivanje PI vrši pri izrazito visokim spoljnim temperaturama, kao posledica mogu da se dobiju sumnjivo visoke vrednosti $tg\delta$ koje ukazuju na loše (nezadovoljavajuće) stanje EIS izolatora. Slično kada se ispitivanje vrši pri jako niskim temperaturama, bliskim nuli, pri analizi je neophodno koristiti velike vrednosti korekcionih faktora čime se dobiju svedene vrednosti faktora dielektričnih gubitaka koje takođe mogu biti sumnjivo visoke. Stoga, u takvim ekstremnim situacijama treba biti oprezan prilikom davanja ocena. Drugim rečima, da bi se ovakve ekstremne situacije izbegle neophodno je da se ispitivanja EIS izolatora, obavljaju pri temperaturama transformatora, odnosno spoljnim temperaturama koje se nalaze u opsegu $5-40^{\circ}\text{C}$, u uslovima relativne vlažnosti vazduha ne većoj od 60%, odnosno bez magle, rose i jakog vetra. Isti uslovi važe i za ispitivanje EIS samog transformatora. Kada se ispitivanje izvodi u navedenim temperaturnim uslovima, primena korekcionih faktora prilikom svođenja na referentnu temperaturu je uz minimalnu pogrešku.

Kao što je već napomenuto, metoda je u suštini poredbeno, te se prilikom analize izmereni rezultati porede sa rezultatima prethodnih periodičnih ispitivanja ili fabričkim rezultatima iz prijemnih ispitivanja. Takođe, mogu biti korisna poređenja sa rezultatima ispitivanja PI istog tipa. Iz svega navedenog može se uočiti da je tumačenje rezultata merenja $tg\delta$ i kapaciteta relativno zahtevno [3].

U tabeli 4 prikazani su orijentacioni kriterijumi navedeni u internom standardu EPS IS 09-2 (Ispitivanje i kontrola energetskih transformatora u pogonu), uz napomenu da je u upotrebi zbog iskustva i prakse tokom merenja [4].

TABELA 4 - Kriterijumi za procenu stanja električnog izolacionog sistema PI prema internom standardu EPS IS 09-2 (Ispitivanje i kontrola energetskih transformatora u pogonu)

Naznačeni napon PI U_n (kV)	$tg\delta$ (%) sveden na 20°C		
	novi PI	PI u pogonu	
		zadovoljavajuće stanje PI	sumnjivo stanje PI
≤ 110	$\leq 0,7$	$\leq 1,0$	$> 1,0$
220	$\leq 0,7$	$\leq 0,9$	$> 0,9$
400	$\leq 0,7$	$\leq 0,8$	$> 0,8$

Što se tiče dinamike ispitivanja PI ona se određuje na osnovu dobijenih rezultata merenja. Pre svega, neophodno je izvršiti merenja $tg\delta$ i kapaciteta C nakon samog postavljanja PI, kao i godinu dana nakon instalacije. Nakon ovih inicijalnih merenja, ponovna merenja $tg\delta$ i C vrše se u intervalima od 3 do 5 godina.

Bilo koji PI čija istorija merenja pokazuje kontinuiran porast vrednosti $tg\delta$, najčešće kao posledica prodora vlage i/ili pojave polarnih produkata starenja EIS, treba da bude posebno tretiran, odnosno dinamika njegovog ispitivanja treba da bude pojačana, a ukoliko rezultati ispitivanja budu nezadovoljavajući, tj. ako odgovarajući kriterijumi nisu zadovoljeni, PI se mora zameniti drugim kako pogon transformatora ne bi bio ugrožen i kako bi se sprečila veća šteta. U svakom slučaju loš izolator treba da bude uklonjen iz pogona, pri čemu je poželjna i konsultacija sa samim proizvođačem izolatora. Ako bilo koji PI ima porast vrednosti $tg\delta$ u određenom vremenskom intervalu, stepen promene $tg\delta$ treba da se kontroliše češćim ispitivanjima. Odluka da se vrše učestalija ispitivanja, odnosno pooštri dinamika ispitivanja, ili da se loš PI ukloni iz pogona donosi se u saglasnosti sa korisnikom, iskustvom stečenim pri održavanju pogona, kao i u zavisnosti od dizajna samog PI između ostalog, a sve to uz uzimanje u obzir preporuka navedenih od strane proizvođača. Dakle, posmatraju se fabrički podaci za taj tip PI, porast vrednosti $tg\delta$, kao i kriterijumske vrednosti.

Kapacitet glavne izolacije PI (najčešće se obeležava sa C_1) meri se paralelno sa merenjem faktora dielektričnih gubitaka i dobijena vrednost se poređi sa onom na natpisnoj pločici, kao i sa rezultatima prethodnih ispitivanja. Merenje kapaciteta je naročito važno kod PI kondenzatorskog tipa, gde porast kapaciteta od 5% [5] u odnosu na inicijalna merenja ili vrednost sa natpisne pločice, zahteva ispitivanje sposobnosti PI da nastavi normalan pogon, pri čemu je poželjno konsultovati se sa proizvođačem.

U nekim slučajevima merenja faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta PI u šemi izolovanog objekta (UST), zbog uticaja kontaminacije i stanja spoljne površine porcelanskog tela PI i postojanja eventualnih provodnih naslaga usled nečistoća ili kondenzacije vlage, može doći do značajnih varijacija i drastičnih odstupanja u dobijenim rezultatima merenja za PI istog naznačenog napona i tipa. Ponekad se može desiti i da se dobije negativna vrednost $tg\delta$. Negativna vrednost $tg\delta$ može se javiti i kao posledica direktnog spoja neke od unutrašnjih obloga sa masom usled proboja, ali u tom slučaju uglavnom dolazi do razletanja PI.

Dakle, standardna praksa prilikom dijagnostičkih ispitivanja PI je da se izvrše merenja $tg\delta$ i C u šemi izolovanog objekta i tako dobijeni rezultati uporede sa prethodno dobijenim rezultatima. Ako postoji trend stalnog porasta ili smanjenja merenih vrednosti, trebalo bi planirati pooštrenu kontrolu ili zamenu PI.

PRAKTIČNA ISKUSTVA PRILIKOM ISPITIVANJA PROLAZNIH IZOLATORA NA TERENU

Primer 1

Tokom 2014. godine izvršeno je ispitivanje EIS prolaznih izolatora transformatora u distribuciji naznačenog napona $U_n=110/10/10$ kV i snage $S_n=31,5$ MVA pri optimalnim vremenskim prilikama.

Na osnovu rezultata ispitivanja – merenje $tg\delta$ i C (tabela 5), uočeno je da PI u fazi "C" ima izuzetno visoku vrednost faktora dielektričnih gubitaka, reda 5-7 %, što višestruko premašuje vrednosti koje su preporučene za normalan i siguran pogon transformatora, dok su PI u ostalim fazama imali vrednost $tg\delta$ reda 0,6-0,8 % što je sasvim zadovoljavajuće u odnosu na njihovu starost i kriterijum za $tg\delta$ do 1 % za naznačeni naponski nivo. Preporučena je hitna zamena PI u fazi "C" jer bi njegov ostanak u pogonu ugrozio pogonsku sigurnost celog energetskog transformatora. Navedeni PI je nedugo zatim zamenjen.

TABELA 5 – Ispitivanje EIS prolaznih izolatora transformatora naponskog nivoa $U_n=110/10/10$ kV i snage $S_n=35$ MVA

Faza	U_n (kV)	U_{isp} (kV)	$tg\delta$ (%)	C (pF)
A	123	5	0,79	160,86
		10	0,79	160,82
B	123	5	0,59	166,88
		10	0,59	166,84
C	123	5	7,80	161,60
		10	5,13	162,29
N	123	5	0,61	156,99
		10	0,61	156,86

Primer 2

Tokom 2016. godine, zbog preporučene pooštrene kontrole, obavljeno je ispitivanje EIS prolaznih izolatora transformatora u distribuciji naznačenog napona $U_n=110/36,75/10,5$ kV i snage $S_n=31,5/31,5/10,5$ MVA neposredno nakon isključenja iz pogona.

Primećeno je da je vrednost $tg\delta$ EIS prolaznog izolatora u fazi "B" povišena, reda 1,3 %, a da pritom prevazilazi preporučenu graničnu vrednost, uz trend pogoršanja u odnosu na prethodno ispitivanje. Kako trenutno stanje navedenog PI nije bilo alarmantno, doneta je odluka da se ispitivanja ponove nakon godinu dana pogona. Naredne godine, ponovnim ispitivanjima izmerene su duplo veće vrednosti, odnosno vrednost $tg\delta$ problematičnog izolatora je bila reda 2,6 % što je ukazalo na značajno pogoršanje, te je predočeno da je dalji pogon transformatora rizičan. Preporučeno je uklanjanje navedenog PI iz pogona ili njegova zamena sa PI u neutralnoj tački – zvezdištu jer je tokom normalnog pogona zvezdište uzemljeno, tj. PI u neutralnoj tački nije naponski opterećen, te bi potencijalni rizik za vreme pogona praktično bio sveden na minimum.

Primer 3

Jedno od zanimljivijih iskustava desilo se u 2016. godini prilikom ispitivanja EIS PI energetskog transformatora naponskog nivoa $U_n=121/10,5$ kV i snage $S_n=45$ MVA. Naime, prilikom prvog ispitivanja dobijeni su rezultati prikazani u tabeli 6 (kolone 5 i 6).

Prilikom merenja faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta EIS visokonaponskih PI na izolatorima u fazama "A" i "B" izmerene su znatno uvećane vrednosti $tg\delta$ u odnosu na prethodno merenje iz 2015. godine (takođe prikazano u tabeli 6 – kolone 3 i 4), pri čemu su vrednosti u obe faze bile iznad preporučenih graničnih vrednosti od 1% za dati naznačeni napon. Uz rezultate navedene su i temperature prilikom svakog od predmetnih ispitivanja. Preporučeno je ponovno ispitivanje radi potvrđivanja dobijenih rezultata i eventualnog preduzimanja daljih koraka u smislu zamene/popravke navedenih izolatora.

Nakon ponovljenih ispitivanja EIS visokonaponskih PI dobijeni su rezultati merenja prikazani u poslednje dve kolone u tabeli 6 koji su bili zadovoljavajući, odnosno vrednost $tg\delta$ bila je u granicama preporučenim za siguran pogon transformatora, uz napomenu da su vrednosti $tg\delta$ u fazama "A" i "B" nešto malo uvećane u odnosu na merenja iz 2015. godine, ali da trenutno ne predstavljaju prepreku za dalji normalan pogon transformatora.

TABELA 6 - Izolacione karakteristike VN PI transformatora naponskog nivoa $U_n=121/10,5$ kVi snage $S_n=45$ MVA za period od 2015. do 2016. godine

Faza	U_{isp} (kV)	2015. (12 °C) prethodno ispitivanje		2016. (22°C) redovno periodično ispitivanje		2016. (18 °C) ponovljeno ispitivanje	
		tgδ (%)	C (pF)	tgδ (%)	C (pF)	tgδ (%)	C (pF)
A	5	0,27	177,19	2,32	179,74	0,71	179,84
	10	0,27	177,12	2,34	179,69	0,71	179,80
B	5	0,26	179,91	5,89	189,95	0,58	180,74
	10	0,27	179,88	5,89	189,91	0,58	180,71
C	5	0,27	179,23	0,71	181,76	0,34	179,57
	10	0,27	179,20	0,72	181,73	0,34	179,54
N	5	0,26	181,00	0,50	182,14	0,28	181,09
	10	0,26	180,94	0,50	182,08	0,28	181,06

Na osnovu ponovljenih merenja i poređenjem sa rezultatima iz 2015. godine, bez potrebe svođenja na referentnu temperaturu jer su temperature tokom ispitivanja bile vrlo bliske, zaključilo se da je stanje EIS prolaznih izolatora zadovoljavajuće, ali je, s obzirom na trenutno nešto veće vrednosti tgδ u fazama "A" i "B", preporučena pooštrena kontrola u cilju detaljnijeg praćenja stanja PI.

Istražujući uzrok za značajno loše rezultate dobijene prilikom prvog ispitivanja EIS prolaznih izolatora u fazama "A" i "B" predmetnog transformatora posumnjalo se na činjenicu da su površine izolatora prethodno tretirane/premazane sredstvom za čišćenje kamena, pri čemu to sredstvo nije korišćeno na adekvatan način, tj. nije napravljena dobra smeša/rastvor, odnosno odgovarajuća proporcija navedenog sredstva i vode. Sumnja je potvrđena u razgovoru sa osobljem zaduženim za održavanje transformatora.

Prilikom ponovljenih ispitivanja izvršeno je dodatno ispitivanje rezervnih izolatora (tabele 7 i 8), a na jednom od njih izveden je i eksperiment merenja tgδ i kapaciteta EIS izolatora pre i posle premazivanja pomenutim sredstvom.

TABELA 7 - Ispitivanje EIS rezervnih PI

Rezervni izolator	U_n (kV)	U_{isp} (kV)	tgδ (%)	C (pF)
1)	123	5	0,164	178,97
		10	0,164	178,94
2)	123	5	0,188	178,87
		10	0,188	178,95
3)	123	5	0,220	179,62
		10	0,220	178,60

TABELA 8 - Ispitivanje EIS rezervnog PI pre i nakon premazivanja sredstvom za čišćenje

Rezervni izolator	Ispitivanje obavljeno	U_n (kV)	U_{isp} (kV)	$tg\delta$ (%)	C (pF)
4)	Pre premazivanja	123	5	0,197	180,12
			10	0,197	180,11
	Posle premazivanja	123	5	0,747	181,28
			10	0,758	181,28

Iz tabele 8 se može uočiti da se nakon premazivanja izolatora dobija znatno lošija vrednost $tg\delta$ što je potvrdilo sumnje, odnosno otkrilo razlog jako loših rezultata merenja.

ZAKLJUČAK

Ispitivanje energetskog transformatora, u konkretnom slučaju ispitivanje električnog izolacionog sistema prolaznih izolatora merenjem faktora dielektričnih gubitaka – $tg\delta$ i kapaciteta – C, predstavlja jako korisno merenje u pogledu dijagnostike energetskih transformatora jer daje uvid u kakvom stanju se nalaze prolazni izolatori. Kroz sama ispitivanja dešavaju se razne situacije koje ponekad u velikoj meri utiču na rezultate merenja, pa ispitivač mora biti spreman, odnosno dovoljno iskusan da prepozna da li su rezultati merenja zaista loši ili su posledica drugih faktora koji unose grešku. Poznavanje stanja prolaznih izolatora predupređuje moguće neželjene kvarove koji, u najboljem slučaju, mogu dovesti do ispadanja transformatora iz pogona, a ponekad i do havarije celokupnog transformatora što za posledicu ima narušavanje pravilnog i pouzdanog rada elektrodistributivnih mreža i velike ekonomske gubitke. Stoga, u cilju obezbeđivanja normalnog rada energetskih transformatora, kao jedne od ključnih komponenti elektroenergetskog sistema, ispitivanje EIS prolaznih izolatora između ostalih mogućih električnih ispitivanja koja se ciljano vrše u sklopu preventivne kontrole i dijagnostike energetskih transformatora, treba da bude jedno od prioritarnih. Treba napomenuti da su sve aktuelnije i moderne tehnologije koje podrazumevaju uređaje za *on-line* monitoring i merenje $tg\delta$ i C prolaznih izolatora.

LITERATURA

- [1] Tobias Stirl, Raimund Skrzypek, Stefan Tenbohlen, Rummiya Vilaithong, "On-line Condition Monitoring and Diagnosis for Power Transformers, their Bushings, Tap Changer and Insulation System", Condition Monitoring and Diagnosis Korea, april 2006.
- [2] Megger – Application Guide for Power Factor testing of Bushings
- [3] Studija: Savremene metode i uređaji za ispitivanje, monitoring i dijagnostiku stanja energetskih i mernih transformatora, grupa saradnika Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“, Beograd, Elektroprivreda Srbije, 2010.
- [4] Interni standard: EPS IS 09-2 - Ispitivanje i kontrola energetskih transformatora u pogonu
- [5] IEEE Std C57-19-100-2012-Guide for Application of Power Apparatus Bushings