

KVAROVI ENERGETSKIH TRANSFORMATORA KOJI SE NISU MOGLI POTVRDITI ELEKTRIČNIM ISPITIVANJIMA

FAILURES OF POWER TRANSFORMERS THAT COULD NOT BE CONFIRMED BY ELECTRICAL TESTS

Siniša SPREMIĆ, Elektrodistribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad, Srbija
Aleksandar ANTONIĆ, Elektrodistribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Električna ispitivanja energetskih transformatora (u daljem tekstu: ET) koji su u pogonu sprovode se u rokovima određenim propisima, standardima ili internim standardima u cilju provere ispravnosti i utvrđivanja stanja izolacionog sistema. Električna ispitivanja ET na terenu se obavljaju i u slučajevima kad postoji sumnja na kvar zbog rezultata ispitivanja ulja (analiza gasova rastvorenih u ulju), termografskog ispitivanja, ispitivanja parcijalnih pražnjenja i dr. Takođe se električna ispitivanja ET na terenu vrše nakon delovanja nekih zaštita u cilju provere ispravnosti ET i utvrđivanja uzroka ispada i mesta kvara. Nakon delovanja zaštita i sumnje na kvar ET uzima se uzorak ulja iz suda transformatora i/ili gasa iz Buchholzovog releja ukoliko ima gasa za analizu gasova rastvorenih u ulju i/ili analizu gasa. U nekim slučajevima nakon delovanja zaštita analiza gasova rastvorenih u ulju pokazuje da nema kvara u ET te se onda uzrok isključenja ET usled delovanja zaštita traži na drugom mestu. U slučajevima kad analiza gasova rastvorenih u ulju pokaže da postoji kvar unutar ET pristupa se električnim ispitivanjima kako bi se utvrdio uzrok ispada i mesta kvara. U većini takvih slučajeva električnim ispitivanjima se utvrdi uzrok i mesta kvara, ali postoje i slučajevi kad električna ispitivanja ne pokazuju neispravnost ET, tj. ne mogu se utvrditi mesta kvara. U radu se podrobno opisuju tri slučaja kvarova ET kod kojih električna ispitivanja nisu pokazala neispravnost ET i mesto ili mesta kvara koja su u dva slučaja utvrđena nakon otvaranja i pregleda ET. U jednom slučaju električnim ispitivanjima ET nije utvrđeno tačno mesto kvara, ali je kvar potvrđen poređenjem rezultata kapacitivnosti namotaja međusobno i prema masi ET u kvaru i drugog ispravnog ET istog tipa, a tačno mesto kvara nakon otvaranja ET.

Ključne reči: Električna ispitivanja, Energetski transformator, Ispitivanje, Kvar

ABSTRACT

Electrical tests of power transformers (hereinafter: PT) that are in operation are carried out within the deadlines set by regulations, standards or internal standards, in order to check the correctness and determine the condition of the insulation system. Electrical tests of PT in the field are also carried out in cases where there is a suspicion of failure due to the results of oil tests (analysis of gases dissolved in oil), thermographic tests, partial discharge tests, etc. Also, electrical tests of PT in the field are carried out after the operation of some protections in order to check the correctness of PT and determining the cause of the outage and the location of the failure. After the operation of the protection and suspected failure of the PT, a sample of oil is taken from the transformer tank and/or gas from the Buchholz relay, if there is gas, for the analysis of gases dissolved in the oil and/or gas analysis. In some cases, after the operation of the protection, the analysis of the gases dissolved in the oil shows that there is no malfunction in the PT, and then the cause of the outage due to the operation of the protection is sought elsewhere. In cases where the analysis of gases dissolved in the oil shows that there is a fault within the PT, electrical tests are carried out to determine the cause of the failure and locations of the fault. In the majority of such cases, electrical tests determine the cause and locations of failure, but there are also cases when electrical tests do not show PT malfunction, i.e. locations of the failure cannot be determined. The paper describes in detail three cases of PT failures in which electrical tests did not show PT malfunction and the location or locations of failure, that were determined in two cases after opening and inspecting the ET. In one case, the electrical tests of the PT did not determine the exact location of the failure, but the failure was confirmed by comparing the PT's in failure winding capacitance results and another correct PT of the same type, and the exact location of the failure after opening the PT.

Key words: Electrical tests, Failure, Oil test, Power transformer

Siniša Spremić, Bulevar oslobođenja 100, 21000 Novi Sad, Srbija, sinisa.spremic@ods.rs

Aleksandar Antonić, Bulevar oslobođenja 100, 21000 Novi Sad, Srbija, aleksandar.antonice@ods.rs

1. UVOD

U razdoblju od oko 20 godina registrovan je veći broj kvarova energetskih transformatora (u daljem tekstu: ET) 110/x kV i 35/x kV koje održavamo. Ovo se odnosi na kvarove u unutrašnjosti, tj. u sudu ET. Delovanje osnovnih zaštita ET (Buholc relej i diferencijalna zaštita gde postoji) i isključenje ET ukazuju na kvar u sudu ET. Nakon svakog delovanja osnovnih zaštita obavljena je analiza gasova rastvorenih u ulju (u daljem tekstu: AGRU, eng. DGA - Dissolved Gases in oil Analysis) koja je pokazala postojanje kvara u sudu ET. Ovih ET su podvrgnuti i nekim od električnih ispitivanja (prenosni odnos, otpor namotaja, otpor izolovanosti namotaja međusobno i prema masi, struje magnećenja, tangens delta namotaja međusobno i prema masi, tangens delta namotaja kapacitivnih 110 kV provodnih izolatora i analiza odziva širokog pojasa učestanosti (u daljem tekstu: SFRA - eng. Sweep Frequency Response Analysis)). U većini slučajeva je ispitivanje ET potvrdilo rezultate AGRU. Ovdje će biti prikazana tri slučaja kvarova ET kod kojih električna ispitivanja nisu pokazala neispravnost ET i mesto ili mesta kvara.

2. KVAROV I ET KOJI SE NISU MOGLI POTVRDITI ELEKTRIČNIM ISPITIVANJIMA

Ukupan broj kvarova u unutrašnjosti ET 110/x kV i 35/x kV zbog kojih su ispitani pre i nakon dobijanja rezultata AGRU je 20, tj. jedan godišnje ili 0,4% od ukupnog broja ET na razmatranom elektrodistributivnom području. Tu nisu uračunati vanjski kvarovi 110 kV provodnih izolatora i kvarovi u sudu regulacionih sklopki po opterećenjem koji su zahtevali ozbiljnije i dugotrajnije popravke ili su ET rashodovani. Od navedenih 20 kvarova u tri slučaja se električnim ispitivanjem ET nije mogao utvrditi uzrok i mesto kvara.

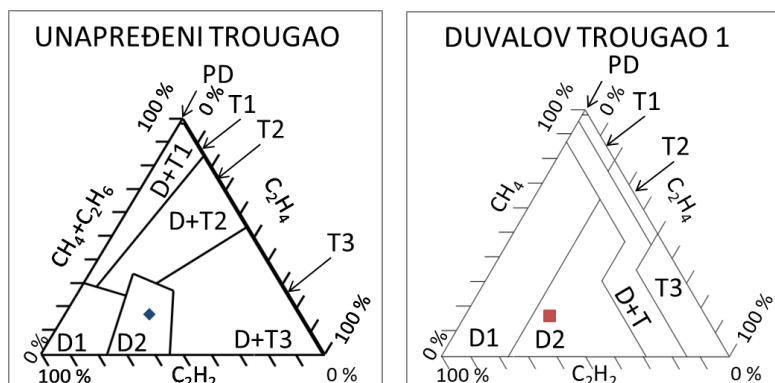
2.1 Električni luk na mestu neispravne montaže savitljive veze

Dana 19.1.2008. godine se dogodio ispad ET delovanjem Buholc releja transformatora 4 MVA, 35/10,5 MVA, sprege Dy5. Nije poznato da li je u trenutku ispada ET bilo atmosferskih pražnjenja, sklopnih prenapona ili drugih poremećaja u mreži. Zbog značaja transformatorske stanice je izvršena hitna zamena ET. Ulje je uzorkovano i ispitano 22.1.2008 godine. Rezultati AGRU su prikazani u tabeli I. Opsezi prema standardu IEC 60599 [1] u tabeli I predstavljaju 90% tipičnih vrednosti količina gasova posmatranih energetskih transformatora bez regulacione sklopke pod opterećenjem i važi i za ostale ovde obrađene slučajeve.

Tabela 1 – Rezultati AGRU sa količinama gasova u ppm

Datum	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Opsezi prema IEC 60599	50-150	30-130	2-20	60-280	20-90	400-600	3800-14000
20080122	129	70	248	139	8	140	2446

Duvalov trougao 1 [1], Unapređeni trougao [2, 3] i Algoritam „S“ [4] saglasno pokazuju da je u pitanju kvar tipa D2 - jaka električna pražnjenja prema položaju tačaka u trouglovima.



Slika 1 – Tumačenje Unapređenog trougla i Duvalovog trougla 1

Nakon prevoza u magacin rezerve ET, ispitana je otpornost izolovanosti namotaja međusobno i prema masi, prenosni odnos i otpornost namotaja. Rezultati su bili ispravni. Zbog sumnje da je u pitanju mogući kvar jakih električnih pražnjenja na besteretnom menjaču odlučeno je da se ET otvori (skidanjem poklopca) i da se pregleda besteretni menjač. Nakon skidanja poklopca i istakanja dela ulja uočeno je da je došlo do proboja između savitljive veze između namotaja i šipke provodnog izolatora u fazi “A” prema sudu ET što je prikazano na slici 2. Prilikom montaže ET savitljiva veza je, umesto da bude savijena na suprotnu stranu od suda ET, kao što je prikazano na slici 2 (deo fotografije levo ispod cipele), bila okrenuta prema sudu ET, što je u jednom trenutku izazvalo električni luk.



Slika 2 – Mesto električnog luka od savitljive veze do suda ET

Pored toga uočeno je da je spoj savitljive veze između namotaja i šipke provodnog izolatora u fazi “C” bio razlabavljen sa vidljivim tragovima grejanja, a moguće i manjeg varničenja (slabog električnog pražnjenja) što se može videti na slici 3.

Moguće je da je pojava pregrevanja i varničenja bila povremena. Da je pregrevanje bilo trajno ili značajnije u nekom razdoblju to bi povećalo količine gasova što bi u trouglovima za tumačenje AGRU verovatno pokazalo pomeranje tačke u područje koje odrađuje kvar kao $D+T_x$, tj. postojanje kvara električnog pražnjenja zajedno sa termičkim kvarom. Ovaj kvar, prema pregledu pokazuje da je moguće da kvarovi pored razvoja u nove ili jače, mogu da pokažu težnju ka nestajanju ili smanjenju.



Slika 3 – Razlabavljen spoj savitljive veze i šipke 35 kV u fazi “C”

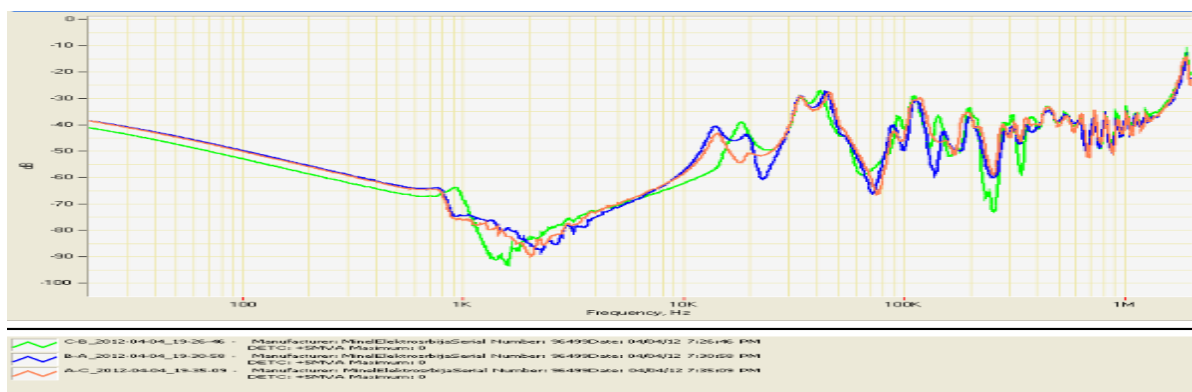
Neka električna ispitivanja koriste visoke napone koji su ipak značajno niži od nazivnih napona (tengens delta, otpornost izolovanosti namotaja) čime ne mogu da izazovu ponovljeni proboj na oslabljenom delu izolacije i time da ukažu na grešku ili uzrok ispada ET.

Nedostaci koji su uočeni su otklonjeni od strane zaposlenih i ET je u određenom razdoblju radio i kasnije je predat u drugo distributivno područje.

Ovaj primer pokazuje da, ukoliko je moguće, pregled nakon otvaranja ET može da pokaže da postoji neki problem u ET koji se ne može utvrditi ispitivanjem.

2.2 Oslabljeno mesto izolacije

Dana 5.4.2012. godine se dogodio ispad ET prenosnog odnosa 35/10,5 kV, snage 8 MVA, sprege Dy5, delovanjem Buholec releja. U vreme ispada ET je bio izložen zemljospoju na 10 kV izvodu koji dovodi do prenapona i moguće električnog luka (preskoka) u sudu ET. U tabeli II su dati rezultati AGRU koji su prema Duvalovom i Unapređenom trouglu u području D2 jakih električnih pražnjenja što daje i Algoritam "S". ET je podrobno ispitano. Ispitane su otpornosti namotaja u svim položajima besteretnog menjača, prenosni odnos, tangens delta i kapacitivnost namotaja međusobno i prema masi, struje magnećenja, SFRA i otpornost izolovanosti namotaja prema masi i međusobno. Kapacitivnosti namotaja međusobno i prema masi su bile dobre i slične rezultatima iz 2007. godine nakon remonta ET. Kapacitivnost niskonaponskog namotaja prema masi se razlikovala od druga dva ET istog tipa, ali je relativno značajna razlika postojala i između dva ispravna ET. Prema slici 4 karakteristike prvog ispitivanja SFRA su pokazivale testerast oblik u rasponu učestanosti između 1 kHz i 10 kHz u odnosu na ET drugog tipa, slične izvedbe, iste snage i prenosnog odnosa i sličnih karakteristika prema ispitnom listu.

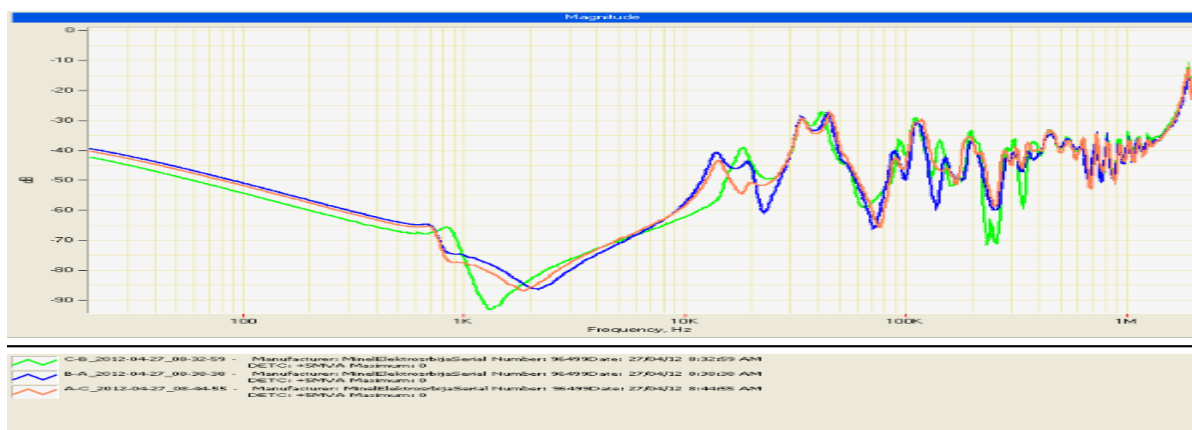


Slika 4 – Izgled karakteristika sa napajanjem sa 35 kV strane sa otvorenim 10 kV namotajem pri smetnjama

Nakon analize ispitnih rezultata ispitivanja SFRA je ponovljeno da bi se proverilo postojanje smetnji kod prvog ispitivanja SFRA. Kod drugog ispitivanja SFRA karakteristika nije imala testerast oblik već oblik prikazan na slici 5, bez testerastog oblika što je potvrdilo sumnju na smetnje prilikom prvog ispitivanja.

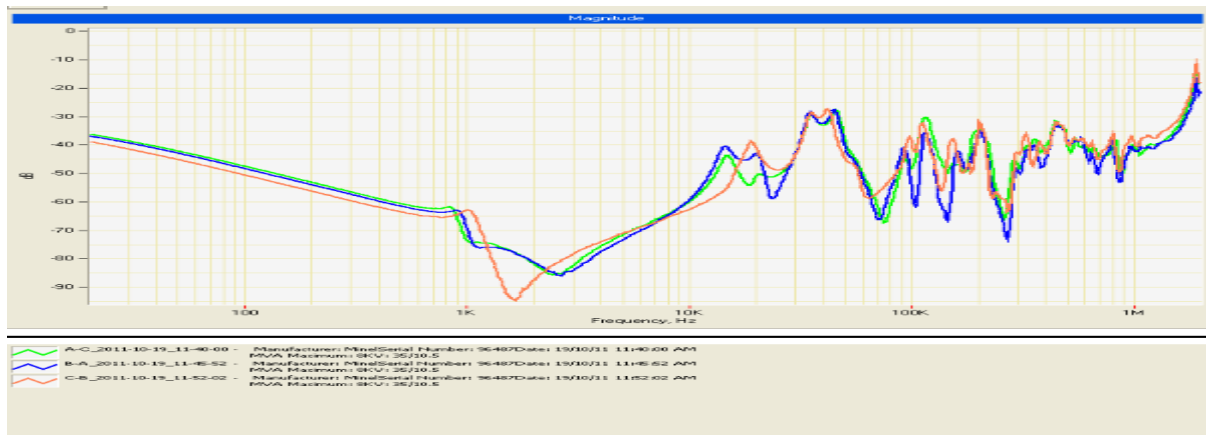
Tabela 2 – Rezultati AGRU sa količinama gasova u ppm

Datum	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	CO	CO2
20120405	701	138	375	186	15	434	1247
20130320	22	27	96	83	7	180	1274
20130910	5	10	49	58	5	180	1686
20131031	1827	132	785	304	30	198	1651
20131104	2962	147	635	277	30	217	1548



Slika 5 – Karakteristike SFRA sa napajanjem sa 35 kV strane sa otvorenim 10 kV namotajem ET sumnjivog na kvar u položaju 1 besteretnog menjača

Kod drugog ispitivanja SFRA karakteristika sa slike 5 nije imala testerast oblik već oblik kao kod sličnog ET kao na slici 6, izuzev razlike između karakteristika A-C u rasponu učestanosti od oko 800 Hz do 3 kHz. S obzirom da su ET različitog tipa nismo mogli ništa zaključiti o mestu i vrsti kvara.



Slika 6 – Karakteristike SFRA sa napajanjem sa 35 kV strane sa otvorenim 10 kV namotajem sličnog ET u položaju 1 besteretnog menjača

Odlučeno je da se ET pusti u pogon. Kasnije su u više navrata uzimani uzorci za AGRU i rezultati od 20.3.2013. i 10.9.2013. godine, prema tabeli II, pokazuju značajno smanjenje količina svih ugljovodoničnih gasova i vodonika što ukazuje na odsustvo kvara u sudu ET.

Dana 31.10.2013. se opet javio zemljospoj 10 kV izvoda koji dovodi do prenapona i opet je odradila Buhole zaštita uz isključenje ET. Rezultat AGRU je prikazan u četvrtom redu tabele II. Duvalov trougao i Unapređeni trougao daju tumačenje D2 jaka električna pražnjenja, a Algoritam “S” pored D2 daje i parcijalna pražnjenja PD zbog velike količine vodonika (H_2), tj. D+PD. Izuzev ispitivanja SFRA obavljena su sva druga ispitivanja kao prethodno i rezultati su bili dobri. ET je opet pušten u pogon, a odlučeno je da se za nekoliko dana ponovi AGRU. Dana 4.11.2013. godine uzet je uzorak za AGRU, a rezultati su dati u petom redu u tabeli II. Duvalov trougao 1 i Unapređeni trougao daju opet tumačenje D2, a Algoritam “S” tumačenje D2+PD. Smanjenje količina acetilena (C_2H_2) i etilena (C_2H_4) ukazuju da je došlo do nestanka kvara električnih pražnjenja (tip kvara D), a povećane vrednosti vodonika (H_2) i metana (CH_4) da je nastavio da postoji izraženi kvar parcijalnih pražnjenja. Odlučeno je da se ET zameni i pošalje u fabriku na pregled i popravku. ET je zamenjen za tri dana 7.11.2013. godine i kasnije odvežen u fabriku. Nakon otvaranja se pokazalo da postoje dva mesta kvara koja su prikazana na slici 7.



Slika 7 – Oštećenja usled kvarova na niskonaponskom namotaju faze “b”

Uočeno je da su pojedini učvršćujući elementi bili polomljeni, namotaj sekundarne faze “b” je izgubio učvršćenje i u radialnom i u aksijalnom pravcu i postojala su izobličenja na namotaju sekundarne faze “b”. Uočeni su tragovi električnih pražnjenja na samom početku niskonaponskog namotaja faze “b” sa određenim ugljenisanjem čvrste izolacije i istopljenim bakrom na dnu, a bilo je i pregrevanja na tački spajanja u zvezdu sekundarnog namotaja u fazi “b”. Prethodno navedeno se može videti na slici 5. Moguće je da je postojao i određeni nivo parcijalnih pražnjenja pre ili tokom jakog električnog pražnjenja.

2.3 Električni luk između visokonaponskog namotaja faze “A” i niskonaponskog namotaja faze “a”

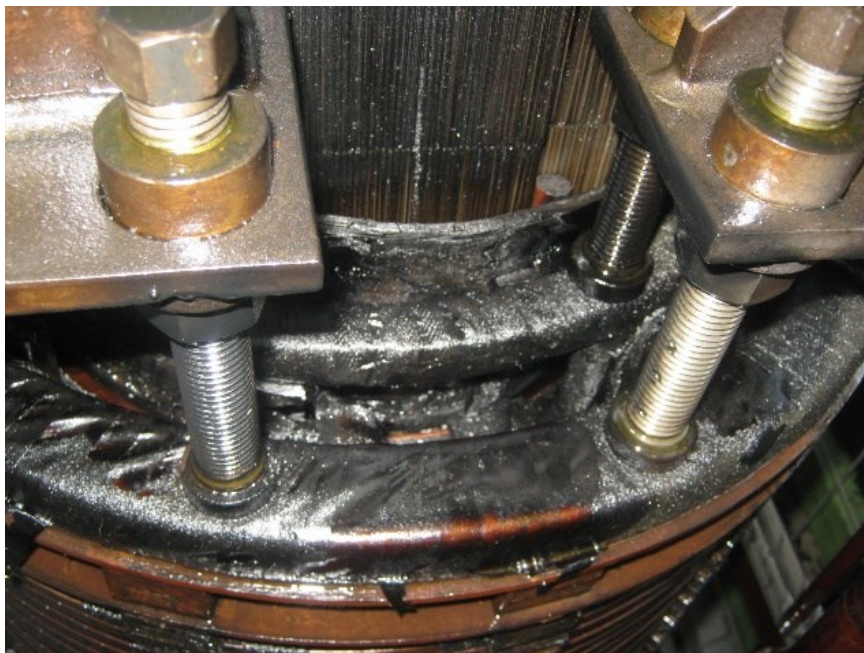
ET snage 2,5 MVA, prenosnog odnosa 35/10,5 kV, sprege Yd5 je isključen delovanjem Buhole releja 1.7.2016. godine. Pronađeni su zapaljivi gasovi u Buhole releju. Pošto je transformatorska stanica radijalno napajana bez mogućnosti rezervnog napajanja odmah je organizovana zamena ET. Uzorkovanje i ispitivanje ulja i ispitivanje ET su obavljani nekoliko dana kasnije. Rezultati AGRU Duvalovog trougla 1, Unapređenog trougla i Algoritma “S” pokazuju kvar D2 – jaka električna pražnjenja. Rezultati AGRU su dati u tabeli III.

Tabela 3 – Rezultati AGRU sa količinama gasova u ppm

Datum	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
20160708	367	170	717	316	17	152	1432

Ispitane su otpornosti namotaja u svim položajima besteretnog menjača, prenosni odnos, tangens delta i kapacitivnost namotaja međusobno i prema masi i otpornost izolovanosti namotaja prema masi i međusobno. Za tangens delta i kapacitivnost nismo imali prethodne rezultate za poređenje, a ostali rezultati su bili dobri.

Da nije bilo ispravnog ET istog tipa koji je ranije ispitan da uporedimo vrednosti kapacitivnosti koje su u svim spregama bile promenjene (veće ili manje), posebno kapacitivnost sprege visoki napon prema niskom naponu, iz ostalih ispitivanja ne bi mogao biti utvrđen kvar. ET je poslat na popravku. Pregledom nakon otvaranja je utvrđen proboj između namotaja visokog napona faze „A“ i namotaja niskog napona faze „a“ što se vidi na slici 8.



Slika 8 – Mesto električnog luka između namotaja visokog i niskog napona između faza “A”-“a”

2.4 Razmatranje prethodnih slučajeva kvarova

Prethodno prikazana tri slučaja kvarova ET dokazuju potrebu da se prilikom ispada ET delovanjem zaštita uradi AGRU da se vidi da li je bilo kvara. U prethodnim slučajevima je AGRU pokazala kvar nakon isključenja ET usled delovanja zaštitnog uređaja, a osnovnim električnim ispitivanjima se nije mogao utvrditi uzrok, mesto ili mesta kvara. Razlog je proboj oslabljenog dela izolacije i njeno obnavljanje nakon kvara i niske vrednosti napona koje se koriste kod električnih ispitivanja ET koje ne mogu izazvati proboj. Najčešće i osnovna ispitivanja ukazuju na uzrok ili mesta kvara, ali ima i ovakvih slučajeva.

U slučaju iz tačke 2.1 samo ispitivanje ET povišenim naponima bi moglo ponoviti proboj, ali je u ovom slučaju u otkrivanju uzroka i mesta kvara pomoglo otvaranje ET i pregled.

U slučaju iz tačke 2.2 ni ispitivanje SFRA nije potvrdilo kvar iako je nakon drugog kvara bilo jasno, kako zbog rezultata AGRU tako i zbog ponovljenih uslova koji su bili u vreme kvara, da je kvar bio zbog oslabljene izolacije ET. Pokazano da se pregledom ne mogu potvrditi parcijalna pražnjenja zbog velikih oštećenja od jakih električnih pražnjenja, ali s obzirom na velike količine vodonika može se pretpostaviti postojanje parcijalnih pražnjenja. Parcijalna pražnjenja su možda pre prvog ispada ET postojala samostalno, ali verovatnije prilikom ispada ET uz jaka električna pražnjenja. Nakon drugog ispada ET parcijalna pražnjenja su postojala samostalno.

U slučaju iz tačke 2.3, da nije bilo rezultata ispitivanja kapacitivnosti namotaja drugog, ispravnog ET istog tipa, ne bi se mogao pouzdano potvrditi kvar električnim ispitivanjima.

3. ZAKLJUČAK

Uz metode koje dobro tumače rezultate, AGRU može dobro da utvrdi da li u ET postoje kvarovi različitih tipova.

Tumačenje AGRU, uz ispravno uzorkovanje i izbegavanje kvarenja uzorka, daje dobar osnov za procenu kvara unutar ET kao što je kod kvarova tipa jakih električnih pražnjenja D2 koji su ovde prikazani.

Električne metode ispitivanja ET u većini slučajeva potvrđuju tumačenja AGRU i pronade se uzrok i mesto ili mesta kvara. Moguće je da se i ne potvrđuju, što je ovde pokazano.

Većina metoda za tumačenje AGRU koje se danas koriste ne prepoznaju ili delimično prepoznaju mešovite ili višestruke kvarove koji su češći nego što se misli i često daju različita tumačenja za isti kvar.

LITERATURA

- [1] IEC 60599:1999+A1:2007, 2007, "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - guide to the interpretation of dissolved and free gas analysis"
- [2] S. Spremić, 2017, „Improvement of Duval triangle 1”, CIRED 24th International Conference on Electricity Distribution, Glasgow, 12-15 June 2017, Paper 0008
- [3] S. Spremić, 2023, "Nove granice Unapređenog trougla za analizu gasova rastvorenih u ulju sa primerima kvarova", 36. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor 2023, R A2.01
- [4] S. Spremić, 2019, "Prikaz tumačenja algoritma za slučajeve analize gasova rastvorenih u ulju", 34. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor 2019, R A2.04