Broj rada: R1-10
DOI:10.46793/CIRED2026.R1-10_122

DVA SLIČNA KVARA ISTOG TIPA TRANSFORMATORA U RAZLIČITIM USLOVIMA POGONA

TWO SIMILAR FAILURES OF THE SAME TYPE OF TRANSFORMERS IN DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

Aleksandar ANTONIĆ, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Srbija[1]
Siniša SPREMIĆ, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Srbija
Goran FILIPOVIĆ, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Na dva transformatora istog tipa, ali različitog podtipa, dogodili su se slični kvarovi u različitim uslovima pogona. Podtip transformatora se odnosi na razliku u ugrađenoj opremi (prolazni izolatori 110 kV), ali su magnetna kola i namotaji iste konstrukcije i regulacione sklopke su istog tipa kod oba transformatora. Zbog različitih uslova pogona ova dva transformatora zemljospojevi jedne od faza tercijera su se na transformatorima različito ispoljili. Na prvom transformatoru je namotaj tercijera zatvoren i uzemljen i on se nije koristio za napajanje potrošača. Na drugom transformatoru je u vreme kvara namotaj tercijera bio u praznom hodu, isključen u transformatorskoj ćeliji 10 kV i povremeno se koristio za napajanje potrošača na naponskom nivou 10 kV. Mesta kvara na transformatorima izgledaju slično. Dato je podrobno razmatranje električnih ispitivanja i ispitivanja ulja pre i nakon uočenih kvarova. Pre glavnog kvara koji je uzrokovao proradu zaštita postojali su i kvarovi u dužem vremenskom razdoblju koji nisu imali uticaj na ispravan rad transformatora.

Ključne reči: Električna ispitivanja, ispitivanje ulja, kvar, transformator

ABSTRACT

Two transformers of the same type, but of different subtypes, experienced similar failures under different operating conditions. The subtype of the transformer refers to the difference in the installed equipment (bushings 110 kV), but the magnetic circuits and windings are of the same construction and the on-load tap changers are of the same type in both transformers. Due to the different operating conditions of these two transformers, the earth faults of one of the tertiary phases manifested themselves differently on the transformers. On the first transformer, the tertiary winding was closed and grounded and it was not used to power supply the consumer. On the second transformer, at the time of the failure, the tertiary winding was switched off, disconnected in the transformer cell 10 kV and was occasionally used to power supply consumers at a voltage level of 10 kV. Fault locations on transformers look similar. A detailed analysis of electrical and oil tests before and after observed failures is given. Before the main failure that caused the protection operation, there were also faults for a longer period of time that had no effect on the correct operation of the transformer.

* Aleksandar Antonić aleksandar.antonic@es.rs; Siniša Spremić sinisa.spremic@es.rs; Goran Filipović goran.filipovic.ns@es.rs

Keywords: Electrical tests, Failure, Oil test, Transformer

UVOD

Dva zemljospoja jedne od faza tercijernog namotaja na dva različita transformatora istog tipa uzrokovala su odradu dve različite zaštite. Uzrok su različiti uslovi pogona u kojima je jedan od transformatora radio sa kratko spojenim i uzemljenim tercijerom, a drugi je radio sa otvorenim neopterećenim tecijerom. Kod drugog se povremeno koristi tercijer za napajanje distributivne mreže 10 kV. Transformatori su prenosnog odnosa 110/21/10,5 kV, snaga 31,5 MVA, sprege Y_ny_n0d5 sa regulacionom sklopkom pod opterećenjem (RS) i opsegom regulacije ±10×1,6%. Izolaciono ulje je mineralno naftenskog tipa sa inhibitorom oksidacije. Nakon kvarova su obavljena sva ispitivanja koja su tada mogla biti obavljena s obzirom na raspoloživu opremu i uslove, a koja bi mogla ukazati na vrstu i mesto kvara. Nakon svakog delovanja osnovnih zaštita obavlja se analiza gasova rastvorenih u ulju (DGA - eng. Dissolved Gases in oil Analysis). U prvom slučaju, nakon odrade Buholc isključenja, DGA je dala tumačenje kvara u sudu transformatora. U drugom slučaju je DGA obavljena nakon signalizacije zemljospoja na distributivnoj mreži 10 kV sa tumačenjem kvara u sudu transformatora. Uz DGA obavljaju se različita električna ispitivanja transformatora. Transformatori su podvrgnuti nekim od sledećih električnih ispitivanja: prenosni odnos, otpor namotaja, otpor izolovanosti namotaja međusobno i prema masi, tangens delta namotaja međusobno i prema masi, tangens delta kapacitivnih prolaznih izolatora 110 kV, analiza odziva širokog pojasa učestanosti (SFRA - eng. Sweep Frequency Response Analysis) i struje magnećenja. Električna ispitivanja transformatora su se slagala sa tumačenjem rezultata DGA.

1 PODROBNO RAZMATRANJE DVA SLIČNA KVARA

1.1 Kvar transformatora sa odradom Buholc relej isključenje

Ovaj transformator je radio sa kratko spojenim i uzemljenim tercijerom.

U većini slučajeva kvarova u sudu transformatora deluju Buholc relej isključenje i diferencijalna zaštita što je bio i ovde slučaj. Drugi transformator je preuzeo opterećenje, a sledećeg dana, 16.7.2012. godine, izvršena su električna ispitivanja i DGA.

Obavljena su sledeća električna ispitivanja: prenosni odnos, otpor namotaja, otpor izolovanosti namotaja međusobno i prema masi, tangens delta namotaja međusobno i prema masi, tangens delta kapacitivnih prolaznih izolatora 110 kV, SFRA i struje magnećenja primara. Zbog ograničenosti prostora biće prikazani samo rezultati koji ukazuju na kvar.

Merenje međufazne otpornosti namotaja spojenog u trougao je kod tercijera pokazalo značajne razlike. U Tabeli I prikazani su rezultati ispitivanja. Može se zaključiti da je namotaj L1 tercijera u kratkom spoju.

Tabela I – Rezultati ispitivanja otpornosti namotaja tercijera

Mereno između	Ispitna struja (A)	Otpornost (Ω)
L1-L3	5	0,08913863
L1-L2	5	0,10770705
L2-L3	5	0,10348456

Merenje prenosnog odnosa je pokazalo da postoji greška u fazi L1 bez obzira na namotaj, a greška se prenosi na namotaje koji nisu u kvaru i na ostale faze. Rezultati su dati u Tabeli II.

Tabela II – Rezultati ispitivanja prenosnog odnosa (m-sekundar, t-tercijer)

Mereno između	Ispitni napon (V)	Greška prenosnog odnosa po položaju RS		
		1	11C	21
L1N-mL1n	500	8,86%	7,63%	6,93%
L2N-mL2n	500	0,91%	0,1%	0,08%
L3N-mL3n	500	0,83%	0,1%	0,08%
L1N-tL3L1	500	12,6%	14,68%	14,34%
L2N-tL1L2	500	1,15%	1,1%	1,56%
L3N-tL2L3	500	1,09%	0,37%	0,52%
mL1n-tL3L1	250		4,47%	
mL2n-tL1L2	250		0,66%	
mL3n-tL2L3	250		0,98%	

U Tabeli III prikazani su rezultati merenja struja magnećenja dovedenim naponom 3×400 V na primarni namotaj. Nije se vodilo računa o redosledu faza, a rezultati prethodnih ispitivanja ukazuju da je najveća vrednost struje magnećenja u fazi L1.

Tabela III – Rezultati ispitivanja struja magnećenja

Mereno (mA)	301,0	30,6	33,1

U Tabeli IV prikazani su rezultati ispitivanja tengens delta i kapacitivnosti namotaja međusobno i prema masi. Prilikom fabričkog ispitivanja 1984. godine temperatura ulja je bila 24°C, pre kvara 2010. godine je bila 50°C, a nakon kvara 33°C. Kod ovog tipa transformatora fabrički nije ispitivana kapacitivnost i tangens delta srednjenaponskog namotaja prema masi (SN-M). Ispitivanjem većeg broja transformatora ovog tipa uočeno je da su vrednosti tangens delta SN-M veće od 0,5%. U Tabeli IV vidi se da je kapacitivnost srednjeg napona prema niskom naponu (SN-NN) prilikom ispitivanja 2010. godine značajno porasla u odnosu na fabričko ispitivanje što ukazuje da je došlo do geometrijskog izobličenja između namotaja SN i NN. Nakon kvara kapacitivnost SN-NN je porasla još više, a pojavila se i značajna razlika kapacitivnosti niskonaponskog namotaja prema masi (NN-M) uz značajan porast vrednosti tangens delta.

Tabela IV – Rezultati ispitivanja tangens delta namotaja međusobno i prema masi

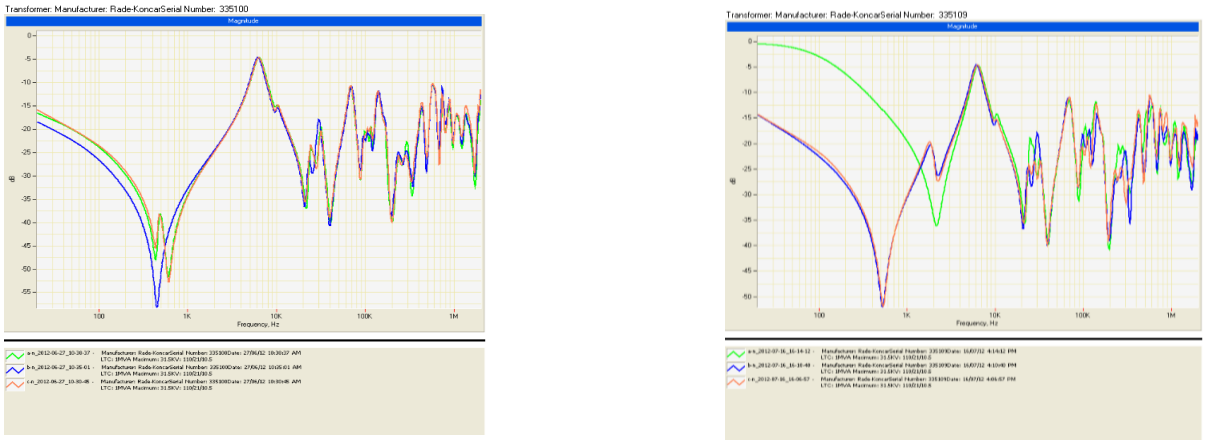
	Ispitni napon (kV)	Fabričko ispitivanje	Fabričko ispitivanje	Pre kvara 2010.	Pre kvara 2010.	Nakon kvara	Nakon kvara
Mereno između	-	C (nF)	Tangens delta (%)	C (nF)	Tangens delta (%)	C (nF)	Tangens delta (%)
VN-SN	10	5,401	0,17	5,4368	0,1649	5,3825	0,2084
VN-NN	10	-		0,0678	-	0,0681	-
SN-NN	10	6,417	0,19	7,4824	0,2200	8,1055	0,3514
VN-M	10	3,104	0,68	3,06	0,83	3,06	0,62
SN-M	10	-	-	0,71	1,00	0,72	0,93
NN-M	10	6,200	0,22	6,29	0,24	6,59	0,84

U Tabeli V prikazan je rezultat merenja otpornosti izolovanosti namotaja NN-M koja je zadovoljavajuća, ali blizu donje granice. Ostale kombinacije nisu prikazane jer su rezultati bili dobri.

Tabela V – Rezultati ispitivanja otpornosti izolovanosti namotaja

Mereno između	Ispitni napon (V)	Otpornost (MΩ) na 15 s	Otpornost (MΩ) na 60s
NN-M	2500	400	425

Ispitivanje SFRA pokazalo je da kod sva tri ispitivanja dovođenjem ispitnog napona na jedan namotaj dok su preostala dva otvorena dolazi do velikog odstupanja krive faze L1 u odnosu na preostale dve faze što ukazuje na kratak spoj u nekom od namotaja na stubu faze L1. Na Slici 1 levo je prikaz frekventnog odziva ispravnog transformatora, a desno transformatora u kvaru za napajanje sa SN strane dok su viskonaponska (VN) i NN strana otvorene.

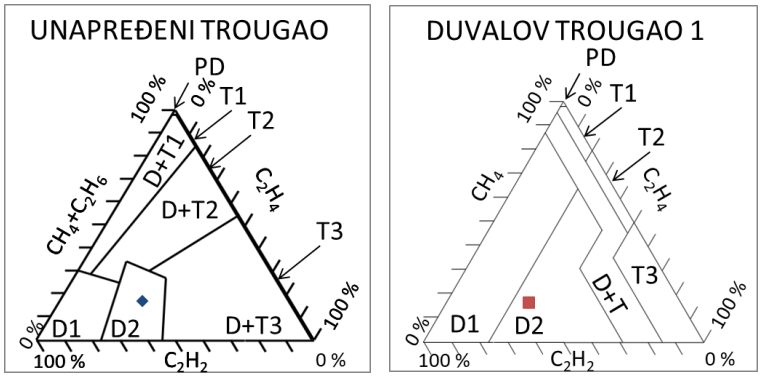


Slika 1 – Frekventni odziv za napajanje sa SN strane uz otvorene namotaje VN i NN strane

U Buholc releju su postojali slobodni gasovi i uzeti su uzorci ulja za DGA iz donjeg nivoa transformatora i iz Buholc releja. U Tabeli VI prikazani su rezultati DGA pre kvara 2011. godine urađene od strane ovlašćene laboratorije i nakon kvara 2012. godine, urađenih prenosnim uređajem. Rezultati DGA posle popravke i puštanja u pogon bili su dobri i ovde nisu prikazani. Opsezi prema standardu IEC 60599 [1] u Tabeli VI predstavljaju 90% tipičnih vrednosti količina gasova posmatranih energetskih transformatora sa RS gde postoji veza između ulja suda transformatora i ulja suda RS preko vazduha u zajedničkom konzervatoru sa pregradom između ulja što važi za transformatore koji se ovde razmatraju. Određena količina gasova kvara koji izlaze iz ulja suda RS, preko zajedničkog vazduha konzervatora prelaze, tj. rastvaraju se, u ulju suda transformatora. Ulje suda RS može da ima veoma velike količine gasova kvara što zavisi od vrste RS i načina rada RS: broja odrada i strujnog opterećenja prilikom promene položaja RS. Na Slici 2 prikazani su Unapređeni trougao i Duvalov trougao 1 za mineralno ulje, a uz njih je dat opis područja u trouglovima.

Tabela VI – Rezultati DGA sa količinama gasova u ppm

Datum	Nivo	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
Opsezi prema [1]	-	50-150	30-130	60-280	60-280	20-90	400-600	3800-14000
20120716	Donji	1195	176	567	277	14	428	1689
20120716	Buholc	1419	183	541	267	14	471	1621
20110428	Donji	16	4	38	31	2	147	1482

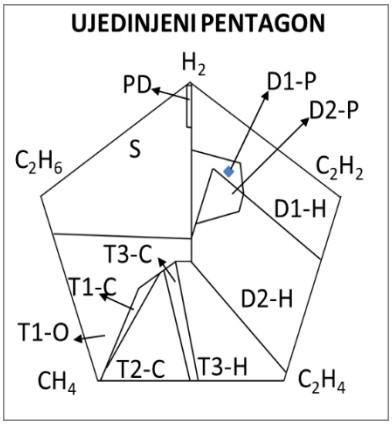


Opis područja trouglova:
D2) Pražnjenja velike energije
D1) Pražnjenja male energije
D+Tx) Mešavina električnih i termičkih kvarova
PD) Parcijalna pražnjenja
T1) Termički kvar T<300ºC
T2) Termički kvar 300<T<700ºC
T3) Termički kvar T>700ºC

Slika 2 –Tumačenje Unapređenog trougla i Duvalovog trougla 1

Algoritam „S" [2] za mineralno ulje nije grafička metoda već metoda zasnovana na algoritmu koja daje tekstualno tumačenje. Pored osnovnog i dodatnog tumačenja uz dodatne podatke daje i preporuku šta dalje treba činiti: ispitivanja, dodatna razmatranja i provere. Za rezutate DGA iz donjeg nivoa od 16.7.2012. godine Algoritam „S" daje osnovno tumačenje: „D2+PD - Velika količina vodonika u odnosu na acetilen i druge gasove ukazuje na PD pre ili uz D2." Algoritam „S" dodatno tumači: „Povišene količine CO i/ili CO_2 usled starenja i/ili pregrevanja uljnopapirne izolacije i/ili električnih pražnjenja u papiru, usled rada na povišenom, ali normalnom temperaturnom opsegu i lošeg kvaliteta ulja (kiselost i voda) i prisustva kiseonika". Duvalov trougao 1 [1] i Unapređeni trougao [3, 4] saglasno tumače da je u pitanju kvar tipa D2 - jaka električna pražnjenja prema položaju tačaka u trouglovima.

Ujedinjeni pentagon (eng. Unified pentagon) [5] za mineralno ulje daje tumačenje D1-P na Slici 3. Kvar je ipak tipa jakih električnih pražnjenja D2, a ne D1.



Opis područja Ujedinjenog pentagona:
PD) Parcijalna pražnjenja korona tipa
D1-H) Pražnjenja male energije u ulju (iz francuskog H-huile)
D2-H) Pražnjenja velike energije u ulju
D1-P) Pražnjenja male energije u papiru
D2-P) Pražnjenja velike energije u papiru
T3-H) Termički kvar T>700ºC u ulju
T3-C) Termički kvar T>700ºC sa karbonizacijom papira
T2-C) Termički kvar 300<T<700ºC sa karbonizacijom papira
T1-C) Termički kvar T<300ºC sa karbonizacijom papira
T1-O) Termički kvar (T1<300ºC i O<250ºC)
S) Gasiranje mineralnog ulja na nižim temperaturama (engleski Stray gassing)

Slika 3 –Tumačenje Ujedinjenog pentagona

Već nakon nekoliko električnih ispitivanja i tumačenja DGA bilo je jasno da postoji ozbiljan kvar unutar suda transformatora te da je kvar u fazi L1 tercijernog namotaja. Odlučeno je da se transformator pošalje na popravku. Prilikom demontaže u fabrici nađeno je da je glavni kvar na početku tercijernog namotaja u fazi L1 koji je imao kratkospojene navojke, a pored toga je bio aksijalno izobličen što se vidi na Slici 4 levo. Uočeno je da je pored kratkog spoja navojaka bio i zemljospoj faze L1 tercijera prema masi (magnetnom kolu) što se vidi na Slici 4 desno.



Slika 4 – Glavni kvar faze L1 tercijera (kratkospojeni navojci i zemljospoj prema magnetnom kolu)

Pored toga, sporedni kvarovi koji nisu uticali na rad transformatora bili su aksijalna izobličenja tercijernog namotaja u fazama L2 na Slici 5 levo i L3 na Slici 5 u sredini i radijalno izobličenje faze L2 sekundarnog namotaja na Slici 5 desno.



Slika 5 – Sporedni kvarovi koji nisu uticali na rad transformatora

U ovom slučaju jedan od zaključaka je da su električna ispitivanja transformatora utvrdila mesto kvara. Uzorkovanje i ispitivanje ulja je obavljeno dan nakon kvara tako da su rezultati DGA iz Buholc releja i donje zone slični. U slučaju da je kvar u donjoj zoni očekuju se veće razlike u količinama gasova iz donje zone i iz Buholc releja ukoliko nije proteklo dovoljno vremena da dođe do ujednačavanja količina gasova u ulju transformatora. Kvar je potvrđen tumačenjem svih prikazanih metoda DGA, ali su tumačenja delom različita i tumačenja nekih metoda su delimično tačna.

Prema prikazanom, jedino Algoritam „S" pored tumačenja jakog električnog pražnjenja daje i tumačenje parcijalnih pražnjenja (D2+PD). Pregledom je utvrđeno jako električno pražnjenje kako između navojaka faze L1 tercijera tako i prema magnetnom kolu. Prisutne su velike količine vodonika (H_2) zbog mogućih parcijalnih pražnjenja koja se ne mogu pregledom utvrditi zbog oštećenja uzrokovanih jakim električnim pražnjenjem. Algoritam „S" opisno ukazuje da postoji povećana količina ugljen-monoksida (CO) čemu uzroci mogu biti različiti, a u ovom slučaju je električno pražnjenje kroz papirnu izolaciju koja je na nekim delovima karbonizovana.

Unapređeni trougao i Duvalov trougao 1 tumače da postoji kvar jakih električnih pražnjenja tipa D2, ali zbog ograničenja da se u trouglovima ne koristi vodonik (H_2) nemaju mogućnost da otkriju da su, zbog velike količine vodonika, možda postojala parcijalna pražnjenja pre ili u toku kvara jakih električnih pražnjenja D2.

Ujedinjeni pentagon smešta tačku u područje D1-P, ali nisu u pitanju slaba električna pražnjenja tipa D1 zbog burnog toka ulja i gasova kroz Buholc relej i isključenja, ali je delimično tačan jer je postojalo električno pražnjenje kroz papirnu izolaciju (deo tumačenja P), što se vidi na Slici 4 levo, a značajno je povećana količina ugljen-monoksida (CO) u odnosu na redovnu DGA obavljenu malo više od godinu dana ranije. Tačnije tumačenje Ujedinjenog pentagona bi bilo D2-P, ali opet bez prepoznavanja mogućih parcijalnih pražnjenja (PD).

Prethodno razmatranje pokazuje da grafičke metode ne mogu da daju potpuno tumačenje za mešovite i višestruke kvarove zbog nemogućnosti da koriste pet gasova kvara (Unapređeni trougao i Duvalov trougao 1) ili kad koriste svih pet gasova kvara grafička metoda (Ujedinjeni pentagon) često ne može dati ispravno tumačenje kvara zbog postavki granica ili nemogućnosti da prepozna mešovite ili višestruke kvarove.

1.2 Kvar transformatora sa signalizacijom U_o zemljospoj na strani 10 kV

Ovaj transformator je radio sa povremeno korišćenim tercijerom 10 kV. Kad tercijer 10 kV nije opterećen nije kratko spajan i uzemljavan što je uobičajeno da se uradi, tj. tercijer je bio u praznom hodu prilikom pojave signalizacije U_o zemljospoj na 10 kV strani.

Prijavljeno je da se pojavio signal U_o zemljospoj na strani 10 kV u trenutku zemljospoja 20 kV faze L2 na drugom transformatoru koji je nakon odrade zemljospojnog prekidača prešao u dvofazni kratak spoj, verovatno sa zemljom. Kratkospojna zaštita je isključila izvod 20 kV. Prilikom pokušaja uključenja, sa ciljem pronalaženja mesta kvara, ponovilo se isto. S obzirom da je tercijer bio u praznom hodu sumnjalo se na problem u transformatoru. Transformator je nastavio normalno da radi uz prisutan signal U_o, a nakon dva dana su izvršena električna ispitivanja i DGA.

Obavljena su sledeća električna ispitivanja po sitnoj kiši: prenosni odnos, otpor namotaja, otpor izolovanosti namotaja međusobno i prema masi i tangens delta namotaja međusobno i prema masi. Zbog kiše je urađen smanjen obim električnih ispitivanja u smanjenom broju položaja RS. Zbog ograničenosti prostora biće prikazani samo rezultati koji ukazuju na kvar.

U Tabeli VII prikazan je rezultat merenja otpornosti izolovanosti namotaja NN-M i pri ispitnom naponu od 5000 V namotaj NN ima proboj prema masi. Ostale kombinacije nisu prikazane jer su rezultati bili dobri.

Tabela VII – Rezultati ispitivanja otpornosti izolovanosti namotaja

	Ispitni napon (V)	Otpornost (MΩ)
Mereno između		15 s
NN-M	5000	0

Merenje međufazne otpornosti namotaja spojenog u trougao je kod tercijera pokazalo značajne razlike. U Tabeli VIII prikazani su rezultati ispitivanja.

Tabela VIII – Rezultati ispitivanja otpornosti namotaja tercijera

Mereno između	Ispitna struja (A)	Otpornost (Ω)
L3-L1	1	0,03074
L1-L2	1	0,03798
L2-L3	1	0,03112
L1-M	3	Uređaj uspeo da dâ struju od 250 mA bez stabilizacije merenja

Merenje prenosnog odnosa je pokazalo da postoji greška na tercijeru. Rezultati su prikazani u tabeli IX.

Tabela IX – Rezultati ispitivanja prenosnog odnosa primar -tercijer

Mereno između	Ispitni napon (V)	Greška prenosnog odnosa po položaju RS		
		1	11C	21
L2N-L1L2	1000	0,60%	0,59%	0,58%

U Tabeli X prikazani su rezultati ispitivanja tangens delta i kapacitivnosti namotaja međusobno i prema masi. Prilikom fabričkog ispitivanja 1986. godine temperatura ulja je bila 21°C, pre kvara 2008. godine je bila 38°C, a nakon kvara 20°C. U Tabeli X vidi se da je kapacitivnost SN-NN u odnosu na fabričko ispitivanje porasla značajno, što ukazuje da je došlo do geometrijskog izobličenja između namotaja SN i NN. Nakon kvara, kapacitivnost SN-NN porasla je još više, a pojavile su se i značajne razlike kapacitivnosti u drugim kombinacijama ispitivanja.

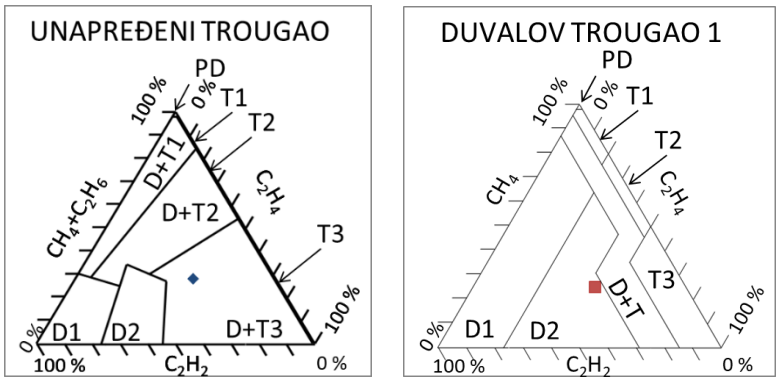
Tabela X – Rezultati ispitivanja tangens delta namotaja međusobno i prema masi

	Ispitni napon (kV)	Fabričko ispitivanje	Fabričko ispitivanje	Pre kvara 2008.	Pre kvara 2008.	Nakon kvara 2009.	Nakon kvara 2009.
Mereno između	-	C (nF)	Tangens delta (%)	C (nF)	Tangens delta (%)	C (nF)	Tangens delta (%)
VN-SN	10	5,317	0,21	4,9558	0,1985	4,9454	0,2548
VN-NN	10	-		0,0682	-	0,357	-
SN-NN	10	6,293	0,19	7,9645	0,2590	8,1405	0,3372
VN-M	10	3,273	0,68	3,68	0,83	3,37	0,44
SN-M	10	-	-	0,71	1,00	0,54	0,67
NN-M	10	6,178	0,28	6,31	0,24	kvar	kvar

U Buholc releju su postojali slobodni gasovi i uzeti su uzorci ulja za DGA iz gornjeg nivoa (iz donjeg nivoa nije bilo moguće) i Buholca. U Tabeli XI prikazani su rezultati DGA pre kvara 2008. godine, urađene od strane ovlašćene laboratorije, i nakon kvara 2009. godine, urađenih prenosnim uređajem. Tu su i opsezi prema [1] i donje granice autorâ rada koje su za „najopasnije" gasove (acetilen za električna pražnjenja i etilen za pregrevanja na visokim temperaturama), značajno niže od donjih granica opsega [1]. Niža granica za acetilen je uzeta jer sama pojava acetilena ukazuje na električna pražnjenja koja su najopasnija vrsta kvara i male količine su korisniku opreme znak mogućeg problema ukoliko izvor gasova nije iz, na primer, suda regulacione sklopke. Niža granica za etilen je uzeta jer se u većim količinama stvara na visokim temperaturama i u slučaju pregrevanja ulja ili ulja i papirne izolacije može dovesti do parcijalnih pražnjenja i električnih pražnjenja, tj. do većeg kvara. Količine gasova su značajne u proceni jačine kvara. Rezultati DGA posle popravke i puštanja u pogon su dobri i nisu prikazani. Na Slici 6 prikazani su Unapređeni trougao i Duvalov trougao 1 za mineralno ulje, a uz njih je dat opis područja u trouglovima.

Tabela XI – Rezultati DGA sa količinama gasova u ppm

Datum	Nivo	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
Opsezi prema [1]	-	50-150	30-130	60-280	60-280	20-90	400-600	3800-14000
Autori – donje granice	-	50	30	2	30	20	400	3800
20091019	Gornji	48	34	46	64	8	86	1012
20091019	Buholc	38	29	42	60	11	78	965
20080403	Donji	6	4	3	7	1	88	851



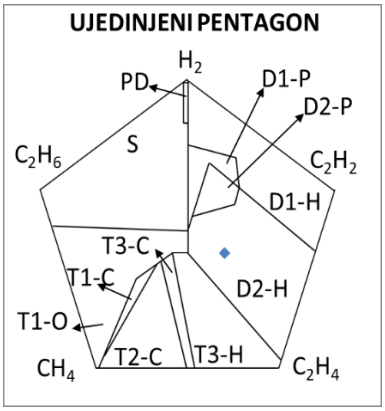
Opis područja trouglova:

D2) Pražnjenja velike energije
D1) Pražnjenja male energije
D+Tx) Mešavina električnih i termičkih kvarova
PD) Parcijalna pražnjenja
T1) Termički kvar T<300°C
T2) Termički kvar 300<T<700°C
T3) Termički kvar T>700°C

Slika 6 –Tumačenje Unapređenog trougla i Duvalovog trougla 1

Za rezutate DGA iz donjeg nivoa od 19.10.2009. godine Algoritam „S" [2] daje za osnovno tumačenje: „D1 slaba električna pražnjenja+T3". „D1 slaba električna pražnjenja" jer nije bilo izdvajanja većih količina slobodnih gasova usled kvara koji bi barem izazvali delovanje signalizacije Buholc relej alarm. Duvalov trougao 1 [1] tumači da je u pitanju kvar tipa D2 - „jaka električna pražnjenja", ali da je kvar tipa D2, postojalo bi buran tok ulja i gasova kroz Buholc relej, a Unapređeni trougao [3, 4] tumači da je u pitanju kvar tipa D+T3 - električna pražnjenja nepoznate jačine i pregrevanje na visokim temperaturama. Ujedinjeni pentagon [5] za mineralno ulje daje tumačenje D2-H na Slici 7. Kvar je ipak tipa slabih električnih pražnjenja D1 sa pregrevanjem na visokim temperaturama T3.

Papir je bio uključen u električna pražnjenja, s malom količinom papira na mestima varničenja i u kratkom vremenskom razdoblju tako da nije bilo izdvajanja veće količine ugljen-monoksida.



Slika 7 –Tumačenje Ujedinjenog pentagona

Rezultati električnih ispitivanja su pokazali da je kvar na tercijeru, da je kvar ozbiljan zbog zemljospoja. Odlučeno je da se transformator pošalje na popravku. Prilikom demontaže u fabrici je nađeno da je glavni kvar na početku tercijernog namotaja u fazi L2 koji je imao zemljospoj prema masi (magnetnom kolu) što se vidi na Slici 8 desno, a pored toga je bio aksijalno izobličen što se vidi na Slici 8 levo.



Slika 8 – Glavni kvar faze "L2" tercijera (zemljospoj prema magnetnom kolu)

Pored toga, sporedni kvarovi koji nisu uticali na rad transformatora bili su manje aksijalno izobličenje tercijernog namotaja u fazi L1 na Slici 9 levo i radijalno izobličenje sve tri faze sekundarnog namotaja na Slici 9, redom: druga sleva faza L1, treća sleva faza L2 i poslednja sleva faza L3.



Slika 9 – Sporedni kvarovi koji nisu uticali na rad transformatora

U ovom slučaju jedan od zaključaka je da su električna ispitivanja transformatora utvrdila mesto kvara (tercijer) i vrstu kvara (zemljospoj). Kvar je potvrđen tumačenjem svih prikazanih metoda DGA, ali su tumačenja delom različita i tumačenja nekih metoda su delimično tačna.

Prema prikazanom, Algoritam „S" daje tumačenje; slabo električno pražnjenje i pregevanje na visokim temperaturama (D1 slabo električno pražnjenje+T3), jer je pregledom utvrđeno slabo električno pražnjenje prema magnetnom kolu iako bi se po fotografijama reklo da je u pitanju jako električno pražnjenje. Jakog električnog pražnjenja nije moglo biti, bez obzira na zemljospoj tercijera prema masi. Tercijer je sa druge strane izolovan tako da se jedino mogu zatvoriti kapacitivne struje koje su male zbog relativno male kapacitivnosti kabela do transformatorske ćelije 10 kV. Kapacitivne struje su, kroz slaba električna pražnjenja, trajale dva dana tako da su izazvale oštećenja kao varove na limovima magnetnog kola. Pregrevanje na visokim temperaturama je moguće, jer je protok struje na otpornostima na mestima dodira provodnika sa limovima magnetnog kola bez pritiska, uz vibracije transformatora, povremeno proizvodio grejanje, a povremeno slaba električna pražnjenja.

Unapređeni trougao tumači da postoji električno pražnjenje neodređene jačine i pregrevanje na visokim temperaturama (D+T3).

Duvalov trougao 1 tumači da postoji kvar električnih pražnjenja neodgovarajućeg tipa D2 – jaka električna pražnjenja, a zbog neodgovarajućih granica ne daje tumačenje pregrevanja na visokim temperaturama, T3.

Ujedinjeni pentagon tumači da postoji električno pražnjenje, ali smešta tačku u područje D2-H iako nisu u pitanju jaka električna pražnjenja tipa D2 zbog izostanka burnog toka ulja i gasova kvara koje bi pobudile Buholc relej isključenje, čak nisu ni umereno jaka električna pražnjenja koja bi stvarala gasove da se nakupe u Buholc releju i dovedu do signalizacije Buholc alarm.

Razmatranje ovog slučaja pokazuje da su grafičke metode u slučajevima mešovitih i višestrukih kvarova ograničene pouzdanosti zbog nemogućnosti da koriste pet gasova kvara (Unapređeni trougao i posebno Duvalov trougao 1) ili kad koriste svih pet gasova kvara grafička metoda (Ujedinjeni pentagon) ne može da ispravno utvrdi kvar zbog postavki granica ili nemogućnosti da prepozna mešovite ili višestruke kvarove. Veći broj slučajeva mešovitih i višestrukih kvarova je prikazan u [2-4, 6-8], a postoje i slučajevi gde se električnim metodama ispitivanja nije mogao otkriti uzrok i mesto ili mesta kvara [6].

1.3 Poređenje dva kvara

U prvom slučaju (tačka 1.1) gotovo sigurno bi došlo do odrade Buholc relej alarm ili isključenja samo sa zemljospojem tercijera na magnetno kolo bez kvara kratkospojenih navojaka tercijera, jer bi zbog kratko spojenih izvoda prolaznih izolatora tercijera i uzemljenog tercijera potekle velike struje kvara uz električni luk. U drugom slučaju (tačka 1.2) nema prorade Buholc releja (ni isključenja ni alarma) uz postojanje zemljospoja tercijera. Razlika je u uslovima pogona, tj. da li je tercijer otvoren u praznom hodu ili je kratko spojen i uzemljen. Slični kvarovi su se različito ispoljili zbog uslova pogona.

U oba slučaja je prema električnim ispitivanjima pre kvara postojala promena kapacitivnosti namotaja koja je ukazivala na dugotrajnu promenu geometrije (izobličenost) sekundarnog namotaja. Nije poznato koliko je dugo trajalo takvo stanje, a moguće je da je trajalo više godina. U početku je radijalna izobličenost sekundarnog namotaja koji je izrađen od „drilajter“ žice, usled kvarova u mreži i elektrodinamičkih sila, dovela do loma izolacionih i učvrsnih elemenata, do aksijalne izobličenosti tercijernog namotaja i na kraju do zemljospoja prema magnetnom kolu uz kratkospojene navojke u prvom slučaju (tačka 1.1).

Iako je uočena promena kapacitivnosti prilikom ispitivanja pre kvara, nije se razmatralo slanje transformatora na remont ili popravku jer u transformatorskim stanicama postoje dva transformatora koji imaju mogućnost preuzimanja opterećenja u slučaju potrebe, a transformator je bio u pogonu bez ikakvih problema. Bilo je moguće sačekati konačan kvar.

Postoji nekoliko transformatora istog tipa kao u prikazanim slučajevima kod kojih je uočena značajnija promena kapacitivnosti između namotaja srednjeg i niskog napona što može da ukaže da je došlo do promene geometrije namotaja koja bi se mogla ispoljiti kvarom kao u prikazanim slučajevima.

2 ZAKLJUČAK

Uslovi pogona transformatora za iste kvarove mogu se različito ispoljiti što je predstavljeno u dva prikazana slučaja.

Električne metode ispitivanja transformatora u većini slučajeva potvrđuju tumačenja DGA i pronađe se uzrok i mesto ili mesta kvara kao u prikazana dva slučaja. Postoje slučajevi gde električnim metodama ispitivanja nije mogao biti otkriven uzrok i mesto ili mesta kvara.

Uz korišćenje pouzdanih metoda za tumačenje, DGA može da potvrdi da u transformatoru postoje kvarovi različitih tipova. Iskusan stručnjak na osnovu rezultata DGA i drugih podataka može da dâ ispravno tumačenje bolje nego različite grafičke metode za tumačenje DGA.

Sve grafičke metode za tumačenje DGA 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.

Posle kvara je potrebno izvršiti podrobna ispitivanja kako bi se stekla iskustva koja onda treba pretočiti u pisani oblik za buduće generacije i za buduća podrobna razmatranja koja mogu da dovedu do novih saznanja.

LITERATURA

[1] IEC 60599:2022, „Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis ”, Edition 4.0, IEC, 2022.
[2] S. Spremić, „Prikaz tumačenja algoritma za slučajeve analize gasova rastvorenih u ulju”, 34. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 2019, R A2.04
[3] S. Spremić, „Improvement of Duval triangle 1”, CIRED 24th International Conference on Electricity Distribution, Glasgow, 2017, Paper 0008
[4] S. Spremić, „Nove granice Unapređenog trougla za analizu gasova rastvorenih u ulju sa primerima kvarova”, 36. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 2023, R A2.01
[5] L. Paulhiac, M. Duval, „Unified pentagon for DGA in mineral insulating oil”, Cigre SC A2 & 6th International Colloquium Transformer Research and Asset Management Joint Colloquium, Split, 2023
[6] S. Spremić, A. Antonić, „Kvarovi energetskih transformatora koji se nisu mogli potvrditi električnim ispitivanjima”, 14. savetovanje CIRED Srbija, Kopaonik, 2024, R 1.04
[7] S. Spremić, „Unapređeni trougao i poređenje sa drugim metodama analize gasova rastvorenih u ulju”, 11. savetovanje CIRED Srbija, Kopaonik, 2018, R 1.08
[8] S. Spremić, „Shortcomings of dissolved in oil gas analysis in recognizing thermal faults inovolving cellulosic materials – an example of low accuracy of Duval triangle 5”, CIRED 28th International Conference on Electricity Distribution, Geneva, 2025, Paper 0012