

ANALIZA SADRŽAJA GASOVA RASTVORENIH U ULJU – ZNAČAJ U DIJAGNOSTICI POGONSKOG STANJA TRANSFORMATORA

V. VASOVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

D. MIHAJLOVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

J. JANKOVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

K. DRAKIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

J. LUKIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

UVOD

Kod uljem punjenih transformatora gasnohromatografska analiza ulja predstavlja jedno od najvažnijih ispitivanja koje se koristi prilikom utvrđivanja pogonskog stanja transformatora. Ovom tehnikom je omogućeno pravovremeno otkrivanje kvarova u transformatoru, čime se izbegavaju veće havarije i iznenadni i neplanirani ispadi. Principi tumačenja rezultata dobijenih gasnohromatografskom analizom ulja zasnivaju se na činjenici da na povišenim temperaturama i prilikom električnog pražnjenja dolazi do degradacije izolacionog ulja (1,2). S obzirom da ulje predstavlja smešu viših ugljovodoničnih jedinjenja, degradacijom na povišenim temperaturama nastaju vodonik, niži ugljovodonici, ugljen monoksid i ugljen dioksid. Prilikom pojave parcijalnih i električnih pražnjenja zavisno do gustine energije nastaju različiti ugljovodonici i vodonik u različitim koncentracijama. U zavisnosti od ozbiljnosti i vrste kvara u transformatoru se razvijaju određene temperature, a u ulju se kidaju slabije odnosno jače veze unutar ugljovodoničnih jedinjenja. Iako nam organska hemija nudi informacije o tome koje temperature su potrebne za nastanak određenih gasova (npr. vodonik nastaje već pri temperaturi od oko 100 °C, dok su za nastanak etilena potrebne temperature od preko 700 °C), reč je samo o tome koje reakcije, odnosno njihovi proizvodi, su na datoj temperaturi favorizovane. Tako npr. pojava etilena, u malim koncentracijama, ne mora biti posledica prisustva toplog mesta sa visokom temperaturom, već može predstavljati rezultat reakcija koje se u datim uslovima odvijaju kao sporedne, a ne dominantne. Zbog toga se prilikom tumačenja gasnohromatografske analize i koristi termin »vodećeg gasa«, gasa koji predstavlja proizvod dominantne reakcije na datoj temperaturi.

Na osnovu različitih baza podataka gasnohromatografskih analiza neispravnih transformatora i tipova kvara, što je utvrđeno nakon inspekcije transformatora u fabrici, formirano je više načina za dijagnostiku kvara računanjem odnosa karakterističnih gasnih parova (1-5). U zavisnosti od toga koji odnosi gasova se u tumačenjima koriste, postoji više načina za interpretaciju gasnohromatografske analize: prema standardu *SRPS EN 60599:2008*, *Duval-ov trougao*, *Rogers-ovi odnosi*, *Metod Nomograma*, *Metod Doernenburg* odnosa... Da bi pristupili tumačenju rezultata gasnohromatografske analize pomoću neke od navedenih metoda nije dovoljno samo da imamo merljive koncentracije karakterističnih gasova u ulju, već i da je koncentracija bar jednog od gasova iznad tzv. uobičajenih vrednosti. U standardima za tumačenje rezultata gasne analize ulja kao što su *SRPS EN*

60599:2008 i IEEE Std C57.106-2002, nalaze se tabele sa uobičajenim koncentracijama ugljovodoničnih gasova koje su izmerene u uljima ispravnih energetskih transformatora(1-2). Osim statističkih granica datih u standardima, od velikog su značaja i individualne granice svakog transformatora ili pojedinih grupacija transformatora istog naponskog nivoa, snage, konstrukcije sistema disanja,...koje se mogu dobiti statističkom analizom rezultata dobijenih dugogodišnjim praćenjem rada istog.

PROCENA OZBILJNOSTI KVARA I URGENTNOST PRIMENE KOREKTIVNIH MERA

Kada se u transformatorskom ulju izmere koncentracije karakterističnih gasova koje ukazuju na postojanje kvara, pristupa se analizi ozbiljnosti kvara. Ozbiljnost kvara i urgentnost primene korektivnih mera zavisi pre svega od tipa kvara, visine izmerenih koncentracija »vodećeg gasa« ali i drugih okolnosti. Prilikom procene ozbiljnosti kvara, od velikog značaja su i informacije o pogonskim događajima i eventualnoj proradi neke od zaštita. Ukoliko je došlo do prorade Buholc alarma, potrebno je uraditi analizu ulja, ali i gasa iz Buholc releja. Za utvrđivanje bliže lokacije kvara od velikog značaja je i uzorkovanje ulja iz sva tri nivoa u transformatoru. Na osnovu razlike u izmerenim koncentracijama gasova u ulju, izvode se zaključci o brzini razvoja kvara i utvrđuje se zona u kojoj je kvar nastao. Kada postoje informacije o prethodnim gasnohromatografskim analizama, od značaja je pratiti dnevne brzine porasta svakog pojedinačnog gasa. Dnevne brzine porasta gasova kvara najčešće se koriste kod termičkih kvarova i to za utvrđivanje lokacije kvara i određivanje brzine s kojom se kvar razvija. Termički kvarovi se obično ne razvijaju brzo, pa ih je potrebno pratiti i po nekoliko meseci. Utvrđivanje lokacije grejanja - magnetno kolo ili namotaj, može se sprovesti upravo upoređivanjem brzina porasta gasova kvara tokom rada transformatora pod punim opterećenjem i tokom praznog hoda.

TABELA 1 - KRITERIJUM ZA POOŠTRENU KONTROLU TRANSFORMATORA NA OSNOVU BRZINA PORASTA GASOVA RASTVORENIH U ULJU (6)

		Tipične vrednosti	Nivo 2	Nivo 3	Nivo 4	Pred-havarijsko stanje
Granične vrednosti brzina porasta gasova, ppm/god	Vodonik	83	179	280	509	1095
	Metan	65	175	313	679	1825
	Acetilen	2	7	17	47	182
	Etilen	89	218	369	745	1825
	Etan	47	176	382	1074	4015
	Ugljen monoksid	660	1737	3054	6491	17000
	Ugljen dioksid	5850	15382	27012	58351	150000
	TDCG	946	2539	4513	9738	26000

TDCG (енг. *total dissolved combustible gas*) ukupni sadržaj zapaljivih gasova, vrednost ne obuhvata ugljen dioksid pošto nije zapaljiv gas

STEPEN ZASIĆENJA ULJA GASOVIMA

Stepen zasićenja predstavlja meru zasićenosti ulja rastvorenim gasovima. Ovaj parametar zavisi od vrste prisutnih gasova, odnosno od njihove rastvorljivosti i količine prisutnih gasova. Tokom pogona u transformatorskom ulju nastaju nepolarni gasovi se slabije rastvaraju u ulju zbog slabih međumolekulskih interakcija. S obzirom da su u pitanju niski pritisci, važi Henrijev zakon koji glasi: količina rastvorenog gasa u ulju direktno je proporcionalna parcijalnom pritisku gasa (7). Takođe, može se usvojiti ponašanje gasova prema jednačini idealnog gasnog stanja. Pritisak svakog pojedinačnog gasa u rastvoru (ulju) na konstantnoj temperaturi se može izraziti preko koncentracije ($P = C \cdot R \cdot T$, gde je C – koncentracija gasa, mol/dm³, R – univerzalna gasna konstanta, 8,314 J/molK i T- temperatura, K). Henrijev zakon glasi:

$$X_1 = K_H \cdot P_1,$$

$$X_1 = K_{H1} \cdot C_1$$

gde je:

X₁ – molski udeo gasa u rastvoru, količina gasa, može se izraziti kao mg/kg, K_H – Henrijeva konstanta, Pa⁻¹, P₁ – parcijalni pritisak gasa, Pa, C₁-koncentracija gasa u ulju, mol/dm³

Rastvorljivost gasova u ulju zavisi od temperature i prirode gasa. Sa porastom temperature raste rastvorljivost gasova u ulju, a stepen zasićenja ulja opada (7,8). Stepen zasićenja ulja gasovima predstavlja udeo gasova rastvorenih u ulju u odnosu na maksimalni sadržaj gasa na datoj temperaturi i izračunava se za prethodno iznete uslove kao zbir parcijalnih pritisaka svakog gasa, tj., zbir koncentracija svakog pojedinačnog gasa:

$$X = \sum K_{Hi} * Ci$$

$$\text{Stepen zasićenja gasova u ulju (na t, °C)} = (K_{N_2,T} * C_{N_2 \text{ ppm}} + K_{O_2,T} * C_{O_2 \text{ ppm}} + K_{CO,T} * C_{CO \text{ ppm}} + K_{CO_2,T} * C_{CO_2 \text{ ppm}} + K_{H_2,T} * C_{H_2 \text{ ppm}} + K_{CH_4,T} * C_{CH_4 \text{ ppm}} + K_{C_2H_6,T} * C_{C_2H_6 \text{ ppm}} + K_{C_2H_2,T} * C_{C_2H_2 \text{ ppm}}) / 10000$$

gde je: X – stepen zasićenja, izražen u %mac, $K_{i,T}$ - Henrijeva konstanta gasa i na datoj temperaturi, C_i ppm - koncentracija svakog pojedinačnog gasa rastvorenog u ulju na datoj temperaturi, mg/kg

Kod transformatora koji imaju visok sadržaj gasova u ulju i visoku brzinu prizvodnje gasova, u određenom momentu na datoj temperaturi može doći do izdvajanja slobodnih gasova. To se dešava kada stepen zasićenja pređe 100% ili u slučajevima naglog razvoja intenzivnog kvara kada nema dovoljno vremena da se nastali gasovi u potpunosti rastvore u ulju. Sa promenom temperature može doći do značajnih promena u stepenu zasićenja ulja gasovima (8). Ukoliko se temperatura naglo snizi može doći do naglog pada stepena zasićenja i posledičnog izdvajanja slobodnih gasova u Buholc relej.

PRORADA BUHOLC ALARMA

Kada dođe do prorade Buholc zaštite i izdvajanja gasa u relej potrebno je izvršiti gasnohromatografsku analizu sadržaja gasova u gasnoj smeši. Na osnovu izmerenih koncentracija gasova u gasnoj smeši računaju se ekvivalentne koncentracije gasova rastvorenih u ulju (C_e)(1,2,7,8). To su u stvari koncentracije gasova u ulju koje bi bile u koncentracionoj ravnoteži sa datim koncentracijama u gasu. Za proračun ekvivalentnih koncentracija gasova u ulju (C_e) potrebno je poznavati radnu temperaturu ulja transformatora u trenutku prorade zaštite i odgovarajuće Ostvaldove koeficijente rastvorljivosti za datu temperaturu. Za svaki pojedinačni gas Ostvaldov koeficijent, k, se definiše kao odnos koncentracije gasa u tečnoj i koncentracije gasa u gasnoj fazi u ravnotežnim uslovima. Brzina i intenzitet kvara nakon prorade Buholc zaštite se, između ostalog, procenjuje i na osnovu poređenja izmerenih koncentracija gasova rastvorenih u ulju i ekvivalentnih koncentracija gasova (C_e) izračunatih na osnovu izmerenih koncentracija u gasu Buholc releja. Na vrednosti ekvivalentnih koncentracija mogu se primeniti karakteristični odnosi gasova (SRPS EN 60599:2008, „Rogers metod“, kao i Duvalov trougao) da bi se dobila šifra, odnosno priroda kvara koja se takođe poredi sa šifrom kvara dobijenom iz rezultata analize ulja iz Buholc releja. Radi kompletnije ocene, u slučaju prorade Buholc zaštite, pored gasa i ulja iz Buholc releja, preporučuje se i gasnohromatografska analiza ulja iz sva tri nivoa transformatora (gornji, srednji, donji ispus), što omogućuje sticanje uvida u brzinu razvoja kvara a nekad i na lokaciju (gornji ili donji deo).

Primer prorade Buholc alarma usled kvara u transformatoru

U Tabeli 2, dat je primer iz prakse gde je došlo do prorade Buholc alarma nakon izdvajanja velike količine gasa iz ulja usled pojave parcijalnih pražnjenja u transformatoru. Na osnovu rezultata gasnohromatografske analize ulja, u distributivnom transformatoru naponskog nivoa 35/10 kV, 4 MVA, nakon prorade Buholc releja u više navrata, dijagnostikovana je pojava parcijalnih pražnjenja velike gustine energije, odnosno kvar sa šifrom C(PD). Ponovnim uzorkovanjem i analizom sadržaja gasova na uzorku ulja nakon dve nedelje pogona, potvrđeno je prisustvo pomenutog kvara. S obzirom da se transformator pola godine pre navedenih analiza nalazio na reviziji usled kvara na regulatoru napona, pretpostavljeno je da je pomenuti kvar nastao nakon-tokom revizije u remontnoj radionici. Transformator je vraćen u fabriku gde je kvar otklonjen što je i potvrđeno gasnohromatografskom analizom nakon ponovnog ulaska u pogon (Tabela 3.)

TABELA 2 - REZULTATI GASNOHROMATOGRFSKE ANALIZE ULJA DISTRIBUTIVNOG TRANSFORMATORA TS 35/10 KV, 4 MVA NAKON PRORADE BUHOLC ALARMA

Datum uzorkovanja	Tu, °C	N	Uk, gml/l	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm									Int
				Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot	
21/04/2015	20	D	66,3	30460	1590	3	12	310	76	589	9479	23738	C (PD)
08/05/2015	22	D	63,5	30686	1630	2	12	334	63	515	8871	21380	C (PD)

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C, N: nivo uzorkovanja (G-gornji, S-srednji, D-donji, URN-ulje regulatora napona, UBR-ulje Buholc relej, GBRRN - gas Buholc releja regulatora napona), Uk,g: količina gasa ekstrahovana iz ulja, (mlgasa)/(lulja), Int: interpretacija rezultata merenja (A-ispravan, B-sumnjiv, C-postojanje kvara), Šifra kvara: PD – Parcijalna pražnjenja

TABELA 3 - REZULTATI GASNOHROMATOGRFSKE ANALIZE ULJA DISTRIBUTIVNOG TRANSFORMATORA TS 35/10 KV, 4 MVA NAKON OPRAVKE

Datum uzorkovanja	Tu, °C	N	Uk, gml/l	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm									Int
				Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot	
14/10/2015	22	D	77,8	2	1	0	6	0	83	928	21360	55410	A

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C, N: nivo uzorkovanja (G-gornji, S-srednji, D-donji, URN-ulje regulatora napona, UBR-ulje Buholc relej, GBRRN - gas Buholc releja regulatora napona), Uk,g: količina gasa ekstrahovana iz ulja, (mlgasa)/(lulja), Int: interpretacija rezultata merenja (A-ispravan, B-sumnjiv, C-postojanje kvara)

Primer prorade Buholc alarma usled temperaturnih oscilacija

U Tabeli 4. dat je primer prorade Buholc zaštite, kao posledica značajnog pada ambijentalne temperature, a samim tim i sniženja radne temperature ulja u transformatoru. Sniženje temperature ulja dovelo je do pada rastvorljivosti gasova u ulju, što je izazvalo naglo oslobađanje gasnih mehurova iz ulja i dovelo do aktiviranja Buholc alarma.

TABELA 4 - REZULTATI GASNOHROMATOGRFSKIH ISPITIVANJA UZORKA GASA I ULJA IZ BUHOLC RELEJA KAO I UZORAKA ULJA IZ GLAVNOG SUDA TRANSFORMATORA SPOSTVENA POTROŠNJA (21/6,9/6,9 KV 60/35/35 MVA)

Datum uzorkovanja	Tu, °C	N	Uk, gml/l	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm									Int
				Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot	
11/06/2015	/	GBR	1	0,0596	0,00084	0,0139	0,00606	0,00138	0,1109	0,7738	/	/	B
	/	Ce	/	1109	323	506	444	30	741	969	/	/	B
	/	UBR	92	36	21	79	96	6	126	2613	27174	61845	B
	/	S	80,3	153	32	73	84	5	361	2453	19068	58072	B
	/	D	79,2	150	32	74	83	5	352	2412	18727	57322	B

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C, N: nivo uzorkovanja (G-gornji, S-srednji, D-donji, URN-ulje regulatora napona, UBR-ulje Buholc relej, GBRRN - gas Buholc releja regulatora napona, Ce-Preračunate ekvivalentne koncentracije gasova u ulju na osnovu analize gasa), Uk,g: količina gasa ekstrahovana iz ulja, (mlgasa)/(lulja), Int: interpretacija rezultata merenja (A-ispravan, B-sumnjiv, C-postojanje kvara)

U Tabeli 5, prikazani su rezultati prethodnih gasnohromatografskih analiza ulja izvršenih u okviru redovne periodične kontrole predmetnog transformatora, na osnovu kojih se vidi da nije došlo do značajnih promena u koncentracijama gasova kvara, odnosno da proradu Buholc zaštite nije izazvalo prisustvo kvara u transformatoru.

TABELA 5 - REZULTATI PRETHODNIH GASNOHROMATOGRFSKIH ANALIZA ULJA TRANSFORMATORA SPOSTVENA POTROŠNJA (21/6,9/6,9 KV 60/35/35 MVA)

Datum uzorkovanja	Tu, °C	N	Uk, gml/l	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm									Int
				Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot	
20/03/2015	50	S	81	181	35	85	83	6	523	3141	18282	58640	B
	/	RN1	92,7	10377	1626	8032	2037	105	615	3151	11050	55693	A
	/	RN2	113,4	11253	4022	29079	6381	395	343	2793	13367	45793	A
15/04/2015	54	S	63,9	162	27	87	59	4	370	2522	14516	46131	B
	/	RN1	78,7	11170	1819	9146	2468	177	448	2655	8986	41396	A
	/	RN2	107,9	14254	3793	18139	5006	276	543	3878	7270	53596	A

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C, N: nivo uzorkovanja (G-gornji, S-srednji, D-donji, URN-ulje regulatora napona, UBR-ulje Buholc relej, GBRRN - gas Buholc releja regulatora napona), Uk,g: količina gasa ekstrahovana iz ulja, (mlgasa)/(lulja), Int: interpretacija rezultata merenja (A-ispravan, B-sumnjiv, C-postojanje kvara)

UKUPAN SADRŽAJ SAGORIVIH GASOVA

Pored pojedinačnih koncentracija sadržaja gasova, njihovih odnosa i trenda promene koncentracija u vremenu, dodatni parametar koji je veoma bitan prilikom definisanja intervala pooštrene kontrole je praćenje ukupnog sadržaja sagorivih gasova (TDCG – eng. *total dissolved combustible gases*)(1,2,7). U sagorive gasove spadaju: vodonik (H₂), metan (CH₄), etilen (C₂H₄), etan (C₂H₆), acetilen (C₂H₂) ugljen-monooksid (CO). Okvirne granične vrednosti date su u Tabeli 1. Ukupan sadržaj gasova posebno je bitan kod analize ulja regulatora napona, gde pri normalnom radu nastaje velika količina zapaljivih gasova, koji su dobro rastvorljivi u ulju. Zbog toga je važno imati uvid u ukupnu količinu prisutnih gasova, da bi se na vreme izvršila zamena ulja i izbegla opasnost od paljenja ulja. Kao značajan parametar tokom praćenja razvoja potencijalnog kvara, preporučuje se i praćenje dnevne brzine porasta ukupnog sadržaja zapaljivih gasova u ulju (ppm/dan).

U Tabeli 6, dat je primer transformatora prigušnice Bloka montirane na termoelektrani, gde je usled termičkog kvara i nakupljanja velike količine zapaljivih gasova u ulju, došlo do sniženja tačke paljenja ulja. U ulju su izmerene ekstremno visoke koncentracije svih gasova kvara, a njihovi odnosi ukazivali su na prisustvo termičkog kvara u višem temperaturnom opsegu, iznad 700°C. Ukupna koncentracija sagorivih gasova je bila iznad 30 %, što predstavlja visok rizik od spontanog paljenja ulja. Izmerena tačka paljenja ulja bila je ispod 90 °C, što je potvrdilo da je verovatnoća pojave požara i/ili eksplozije bila velika.

TABELA 6 - REZULTATI GASNOHROMATOGRAFSKOG ISPITIVANJA ULJA TRANSFORMATORA PRIGUŠNICA BLOKA (6 KV, 2,5 MVA)

Datum uzorkovanja	Tu, °C	N	Uk, gm/l	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm									Int
				Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot	
07/03/2011	40	D	450	737	22994	124633	232030	21834	272	2888	3420	40730	C(T3)
17/03/2011	53	D	330,8	886	24261	91108	180063	23841	123	1903	864	24261	C(T3)

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C, N: nivo uzorkovanja (G-gornji, S-srednji, D-donji, URN-ulje regulatora napona, UBR-ulje Buholc relej, GBRRN - gas Buholc releja regulatora napona), Uk,g: količina gasa ekstrahovana iz ulja, (mlgasa)/(lulja), Int: interpretacija rezultata merenja (A-ispravan, B-sumnjiv, C-postojanje kvara), Šifra kvara: T3 - termičko razaranje na visokim temperaturama > 700 °C

TERMIČKI KVAR: PRAĆENJE STEPENA ZASIĆENJA ULJA GASOVIMA I DNEVNE BRZINE PORASTA GASOVA KVARA

Ukoliko se gasnohromatografskom analizom ulja utvrdi prisustvo termičkog kvara u određenom transformatoru, jedno od najvažnijih pitanja koje se zatim postavlja je lokacija kvara, odnosno da li toplo mesto zahvata papirnu izolaciju ili ne. Ovo se procenjuje pomoću više različitih metoda, kao što su: računanje odnosa ugljenikovih oksida, analiza sadržaja derivata furana u ulju i sadržaja metanola i etanola u ulju (jedinjenja koja nastaju kao posledica degradacije celulozne izolacije). Takođe, u ovu svrhu se koristi i praćenje brzina porasta gasova kvara u ulju pod uobičajenim pogonom i u režimu praznog hoda. Njihovim upoređivanjem može se izvesti zaključak o tome da li je toplo mesto prisutno u magnetnom kolu ili na namotajima transformatora. U Tabeli 7 dat je primer distributivnog transformatora kome je dijagnostikovano prisustvo kvara sa temperaturom toplog mesta preko 700° C. S obzirom da je pomoću svih dostupnih metoda utvrđeno da grejanjem nije zahvaćena celulozna izolacija, transformator je ostavljen u pogonu u režimu pooštrene kontrole gasnohromatografskom analizom ulja. Na osnovu rezultata računata su dnevne brzine porasta gasova kvara i praćen je stepen zasićenja ulja gasovima. Na ovaj način praćena je brzina razvoja kvara i vođena briga o tome da ne dođe do prorade Buholc alarma usled zasićenosti ulja gasovima. Predmetni transformator u ovom režimu radi već skoro deset godina.

TABELA 7 -REZULTATI GASNOHROMATOGRAFSKIH ANALIZA ULJA TOKOM VIŠEGODIŠNJEG PRAĆENJA RADA DISTRIBUTIVNOG TRANSFORMATORA (220/110 KV, 150 MVA) SA PRISUTNIM TERMIČKIM KVAROM

Datum uzorkovanja	Tu, °C	N	Ug, mlgas/lulja	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm									H2O	2-FAL	Int
				Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot			
19/09/2008	30	D	64,1	536	1032	2	1801	316	698	5237	3495	51029	6	/	C(T3)
03/06/2009	33	D	21,3	378	817	0	1223	238	156	2564	1579	14319	/	/	C(T3)
29/01/2010	21	D	40,6	646	2252	0	2742	590	272	2967	1833	29356	/	/	C(T3)
19/11/2010	58	D	67,1	1361	4676	2	7805	1508	272	2182	3923	45337	13	0	C(T3)
17/02/2011	10	D	55,7	1441	4671	1	6486	1355	467	3531	959	30587	3	0	C(T3)
16/11/2012	30	D	56,4	2340	7073	2	10448	2113	163	2859	2572	22582	/	/	C(T3)
09/08/2013	40	/	85,9	2077	8796	12	13860	2787	207	4385	7610	37243	8	0,01	C(T3)
16/04/2014	30	D	63,5	2650	9682	2	14982	2837	246	2523	1782	21207	/	/	C(T3)
25/03/2015	30	D	63,3	1945	11042	0	14987	3254	262	2548	1872	27351	8	0,01	C(T3)
30/03/2016	40	D	59,6	1113	9709	0	13318	2838	272	3410	1882	27016	4	0	C(T3)

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C, N: nivo uzorkovanja (G-gornji, S-srednji, D-donji, URN-ulje regulatora napona, UBR-ulje Buholc relej, GBRRN - gas Buholc releja regulatora napona), Ug,g: količina gasa ekstrahovana iz ulja, (mlgasa)/(lulja), Int: interpretacija rezultata merenja (A-ispravan, B-sumnjiv, C-postojanje kvara), Šifra kvara: T3 - termičko razaranje na visokim temperaturama > 700 °C

Sumnja na prisustvo termičkog kara usled difuzije gasova

Odavno je poznato da gasovi nastali u ulju regulatora napona (gasovi električnog luka) mogu difundovati u ulje glavnog suda ukoliko je zaptivenost suda regulatora napona popustila. U takvim slučajevima, transformatori se ocenjuju kao ispravni čak iako imaju po nekoliko desetina ppm acetilena u ulju. Ovde je prikazan neobičan slučaj kontaminacije ulja dva transformatora gasovima termičkog kvara preko zajedničkog konzervatora. U pitanju je monofazni transformator montiran na hidroelektrani, kod koga se razvio termički kvar sa temperaturom toplog mesta od preko 700° C. Budući da je transformator kod koga se kvar razvio (Tr1) imao zajednički konzervator sa još dva transformatora, gasovi kvara su difundovali u ulje glavnog suda druga dva transformatora (Tr2 i Tr3) i izazvali sumnju da je u sva tri transformatora prisutan kvar. Naime, nakon redovne periodične kontrole sva tri transformatora, dobijeni su rezultati prikazani u Tabeli 8.

TABELA 8 - REZULTATI ISPITIVANJA ULJA TRI MONOFAZNA TRANSFORMATORA SA ZAJEDNIČKIM KONZERVATOROM

Transformator	Datum uzorkovanja	Tu, °C	N	Uk, gml/l	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm									Int
					Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot	
Tr 1	25/08/2015	40	D	86,2	559	1048	31	1664	312	447	3178	20853	58110	C (T3)
Tr 2	25/08/2015	40	D	82,4	91	144	4	256	45	431	3075	20707	57663	C (T3)
Tr 3	25/08/2015	40	D	89,2	66	133	4	240	40	247	2445	25059	60957	C (T3)

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C, N: nivo uzorkovanja (G-gornji, S-srednji, D-donji, URN-ulje regulatora napona, UBR-ulje Buholc relej, GBRRN - gas Buholc releja regulatora napona), Uk,g: količina gasa ekstrahovana iz ulja, (mlgasa)/(lulja), Int: interpretacija rezultata merenja (A-ispravan, B-sumnjiv, C-postojanje kvara), Šifra kvara: T3 - termičko razaranje na visokim temperaturama > 700 °C

Nakon informacije o zajedničkom konzervatoru i pretpostavljeno je da je došlo do kontaminacije ulja druga dva transformatora gasovima kvara i odlučeno je da se uradi i analiza ulja iz konzervatora. Ponovljena analiza ulja iz sva tri transformatora nakon mesec dana pogona i analiza ulja iz zajedničkog konzervatora dala je sledeće rezultate.

TABELA 9 - REZULTATI ISPITIVANJA ULJA TRI MONOFAZNA TRANSFORMATORA I ZAJEDNIČKOG KONZERVATORA

Transformator	Datum uzorkovanja	Tu, °C	N	Uk, g/ml/l	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm									Int
					Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot	
Tr 1	22/09/2015	40	D	89,1	1173	1975	65	3037	562	493	3179	20632	57997	C (T3)
Tr 2	22/09/2015	39	D	81,2	145	318	11	555	102	410	2920	21033	56694	C (T3)
Tr 3	22/09/2015	40	D	86,0	140	313	10	539	99	323	2701	23186	58725	C (T3)
Zajednički konzervator	22/09/2015	40	D	90,3	45	115	5	266	53	142	3675	25797	60163	/

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C, N: nivo uzorkovanja (G-gornji, S-srednji, D-donji, URN-ulje regulatora napona, UBR-ulje Buholc relej, GBRRN - gas Buholc releja regulatora napona), Uk,g: količina gasa ekstrahovana iz ulja, (mlgasa)/(lulja), Int: interpretacija rezultata merenja (A-ispravan, B-sumnjiv, C-postojanje kvara), Šifra kvara: T3 - termičko razaranje na visokim temperaturama > 700 °C

S obzirom da je koncentracija gasova kvara u konzervatoru bila niža nego u bilo kom od transformatora, sumnja da je kvar ipak prisutan u sva tri transformatora je pojačana. Nakon uzorkovanja ulja, transformator sa najvećom koncentracijom gasova kvara (Tr1) radio je još neko vreme, a zatim je demontiran i na njegovo mesto je došla rezerva. Posle nekoliko nedelja pogona, ulje je uzorkovano iz dva transformatora koja su sve vreme bila u pogonu, kao i iz rezerve (Tabela 10). U ulju rezervnog transformatora izmerene su koncentracije termičkih kvarova slične kao što su u okviru prethodne analize izmerene u zajedničkom konzervatoru, a koncentracije istih gasova u preostala dva transformatora nisu dalje rasle. Ovo je bio dokaz da je u pitanju ipak bila kontaminacija ulja preko zajedničkog konzervatora. Kod transformatora u hidroelektranama dolazi do bržeg mešanja ulja glavnog suda i konzervatora usled forsirane cirkulacije ulja, te se difuzija gasova kvara veoma brzo odvijala. Razlog zbog kog su koncentracije gasova kvara u konzervatoru bile niže nego u transformatorima, leži u tome što je ovo ulje u kontaktu sa atmosferom, pa iz njega gasovi lakše isparavaju.

TABELA 10 - REZULTATI ISPITIVANJA ULJA TRANSFORMATORA TR2, TR3 I REZERVNOG TRANSFORMATORA, NAKON DEMONTAŽE NEISPRAVNOG TRANSFORMATORA (TR1)

Transformator	Datum uzorkovanja	Tu, °C	N	Uk, g/ml/l	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm									Int
					Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot	
Tr 2	16/11/2015	30	D	81,2	94	301	10	555	106	352	2849	20869	56102	C(T3)
Tr 3	16/11/2015	30	D	80,3	48	209	7	409	80	224	2251	21821	55277	C(T3)
Rezerva	16/11/2015	30	D	67,9	29	121	4	241	48	178	1377	18425	47493	B(T3)

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C, N: nivo uzorkovanja (G-gornji, S-srednji, D-donji, URN-ulje regulatora napona, UBR-ulje Buholc relej, GBRRN - gas Buholc releja regulatora napona), Uk,g: količina gasa ekstrahovana iz ulja, (mlgasa)/(lulja), Int: interpretacija rezultata merenja (A-ispravan, B-sumnjiv, C-postojanje kvara), Šifra kvara: T3 - termičko razaranje na visokim temperaturama > 700 °C

ATIPičNE ŠIFRE KVAROVA

Prilikom tumačenja rezultata gasnohromatografskih analiza dešava se da se dobiju takvi odnosi gasnih parova da se ne može izvesti zaključak koji je kvar u pitanju, odnosno dobija se *atipična šifra kvara*. Razlog tome može biti difuzija gasova iz regulatora napona u ulje glavnog suda transformatora, sinergija dva kvara, ali i afinitet samog ulja da generiše veće količine vodonika, metana i/ili etana čak i pri ispravnom radu transformatora ili u uslovima nisko-temperaturnog grejanja od 80 do 120 °C. U takvim slučajevima od velike koristi može biti test gasiranja ulja (eng. *Stray gassing test*). To je jednostavan laboratorijski test kojim se utvrđuje da li ulje poseduje svojstvo da lako otpušta vodonik i niže ugljovodonike. U Tabeli 11 prikazan je primer distributivnog transformatora gde su rezultati gasnohromatografske analize ukazivali na postojanje termičkog kvara, dok su rezultati testa gasiranja ulja pokazali da je afinitet ulja da stvara vodonik (Tabela 12), metan i etan veliki, te da u transformatoru nije prisutan kvar. Ipak, čak i kada u transformatoru nije prisutan kvar, ali je prisutno neobično

gasiranje ulja, mora se voditi racuna o parametrima kao sto su dnevne brzine porasta gasova, stepen zasićenja ulja gasovima i o ukupnom sadržaju zapaljivih gasova.

TABELA 11 - REZULTATI GASNOHROMATOGRAFSKE ANALIZE ULJA DISTRIBUTIVNOG TRANSFORMATORA (35/10 KV, 8 MVA)

Uzorak	T, °C	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm								
		Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot
27/05/2010	58	152	123	0	13	208	474	1871	71	61400
16/12/2010	29	199	158	0	18	260	325	801	339	79841
15/06/2011	50	189	115	0	14	216	533	2408	1910	61841
21/03/2012	40	126	108	0	11	156	480	2190	310	60574
20/03/2013	40	110	83	0	11	122	496	2411	1421	60849

Tu: temperatura ulja prilikom uzorkovanja, °C,

TABELA 12 - REZULTATI STRAY GASSING TESTA NA 120 °C NA ULJU DISTRIBUTIVNOG TRANSFORMATORA (35/10 KV, 8 MVA)

Uzorak	Pojedinačne koncentracije gasova u ulju, ppm								
	Vodonik	Metan	Acetilen	Etilen	Etan	Ugljen monoksid	Ugljen dioksid	Kiseonik	Azot
16h	642	475	0	8	221	701	770	342	61432
164h	784	758	0	37	387	927	1309	538	60495
164h + 16h	163	52	0	3	19	806	870	191	61029

ZAKLJUČAK

Analiza sadržaja gasova rastvorenih u ulju, vrlo je često prvi pokazatelj da je u transformatoru prisutan kvar, ali i kolika je ozbiljnost kvara. Prilikom tumačenja rezultata gasnohromatografske analize, izmerene koncentracije gasova u ulju moraju se posmatrati zajedno, odnosno računanjem karakterističnih odnosa gasova. Izvođenje zaključaka o tipu kvara posmatranje koncentracije nekog gasa individualno lako može dovesti do greške. Ovo je upravo zbog toga što ne znači »svaki izmereni ppm« nekog gasa da je u transformatoru prisutan kvar i da neki gasovi mogu predstavljati proizvod ne dominantnih, već sporednih i konkurentnih hemijskih reakcija. Ozbiljnost kvara i urgentnost primene korektivnih mera zavisi pre svega od tipa kvara, visine izmerenih koncentracija »vodećeg gasa« ali i drugih okolnosti, kao što je ugroženost sigurnosti pogona zbog velike količine proizvedenih zapaljivih gasova i sniženja protiv-požarnih karakteristika. Prilikom procene ozbiljnosti kvara, od velikog značaja su i informacije o pogonskim događajima i eventualnoj proradi neke od zaštita. Ukoliko je došlo do prorade Buholc alarma, potrebno je uraditi analizu ulja, ali i gasa iz Buholc releja. Za utvrđivanje bliže lokacije kvara od velikog značaja je i uzorkovanje ulja iz sva tri nivoa u transformatoru. Dnevne brzine porasta gasova kvara najčešće se koriste kod termičkih kvarova i to za utvrđivanje lokacije kvara i određivanje brzine s kojom se kvar razvija. Stepenn zasićenja ulja gasovima je parametar koji je važno pratiti npr. kod termičkih kvarova gde nije zahvaćena celulozna izolacija pa transformator može da radi u tom stanju, ali je s vremena na vreme potrebno izvršiti degazaciju ulja kada se dostigne alarmantni stepenn zasićenja ulja gasovima. Kod ovih kvarova neophodno je pratiti i ukupni sadržaj sagorivih gasova, da ne bi došlo do sniženja tačke paljenja ispod dozvoljenog nivoa i ugrozilo bezbednost transformatora. Ovo je bitan parametar i prilikom praćenja rada regulatora napona pošto se sagorivi gasovi stvaraju u velikoj količini i pri normalnom radu regulacione sklopke, a posebno ukoliko se zamena ulja regulatora napona vrši na duge vremenske intrevale, pa sakupljena količina gasova može biti izuzetno velika, tako da snizi tačku paljenja ulja na temperature bliske letnjim ambijentalnim (oko 40 °C). Ukoliko se na osnovu rezultata analize sadržaja gasova u ulju dobija atipična šifra kvara, u zavisnosti od vrste gasova prisutnih u ulju, test gasiranja ulja može dosta pomoći u otklanjanju sumnje da li je u transformatoru prisutan kvar ili je samo reč o afinitetu ulja da izdvaja gasove u uslovima blagog grejanja na temperaturama koje nisu po definiciji u opsegu temperatura kvarova (≤ 120 °C).

LITERATURA

- [1] SRPS EN 60599:2008: Električna oprema u pogonu impregnirana mineralnim uljem - Uputstvo za interpretaciju analiza rastvorenih i oslobođenih gasova
- [2] IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment, IEEE Std C57.106-2002

- [3] Michael Duval „Smart Grid Monitoring of transformers by DGA“, . CIGRE, Thailand, Bangkok 2013
- [4] Michel Duval, „ New frontiers of DGA interpretation for power transformers and their accessories“ Hydro Quebec IREQ, Varennes J3X1S1, Canada
- [5] Mariu Grisaru „Economical and reliable transformer maintenance by holistic interpretation of insulating oil condition“, magazine Transformers, volume 1 issue 1, strana 54-62.
- [6] CIGRE Brochure 443: DGA in Hon-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria, December 2010
- [7] „Ispitivanje izolacionih ulja“ Eps Interni standard ICS 29.180 EPS IS 26-1 Mart. 2014
- [8] Elektrotehnički institut Nikola Tesla, A. D. Beograd, Koste Glavinića 8a „SAVREMENE METODE I UREĐAJI ZAISPITIVANJE, MONITORING I DIJAGNOSTIKU STANJA ENERGETSKIH I MERNIH TRANSFORMATORA“ , 30.12.2010, 419 strana