



Sonja Čabrajac, dipl.ing.
Anđela Hadži-Skerlev, dipl.ing.
Končar – Institut za elektrotehniku, Zagreb

12-06

PRILOG TUMAČENJU KROMATOGRFSKE ANALIZE PLINOVA IZ TRANSFORMATORA

SAŽETAK

Pojašnjeni su pojmovi važni za razumijevanje i primjenu kromatografske analize plinova iz transformatorskog ulja. Ova dijagnostička metoda u najširoj je upotrebi za otkrivanje i procjenu grešaka i kvarova u transformatorima. Prikazan je pristup interpretaciji rezultata ispitivanja.

Ključne riječi: Kromatografska analiza, transformator, dijagnostičke metode

CONTRIBUTION TO THE EXPLANATION OF CHROMATOGRAPHY ANALYSIS OF GASES FROM TRANSFORMERS

ABSTRACT

Important concepts for understanding and using of chromatographic analysis of gases from transformer oil are explained. This method is one of the most widely used diagnostic tools for detecting and evaluating faults and failures in transformers. Approach to the interpretation of the test results is reported.

Key words: Chromatographic analysis, transformer, diagnostic methods

1. UVOD

Činjenica da se u transformatoru tijekom pogona iz transformatorskog ulja mogu razvijati plinovi, poznata je od samih početaka proizvodnje uljnih transformatora. Još 1928.god. prvi je put upotrebljen Buchholz relej za sakupljanje plinskih mjehurića koji prolaze kroz ulje prema konzervatoru. Izvedba releja u osnovi je do danas nepromijenjena. Preko dva plovka na površini ulja u komori Buchholz releja, kod određene se količine plina uključuje signal upozorenja, a kod više plina isključuje transformator iz pogona.

Istraživanjem svojstava plina uočeno je da je plin izdvojen kod proboja odnosno luka kroz ulje, zapaljiv. 1959. god. H.H. Wagner prvi je primjenio terenski plinski detektor za otkrivanje acetilena i vodika. Propuštanjem plina iz Buchholz releja kroz cjevčice napunjene specifičnim reagensom u prisutnosti traženog plina nastaje obojenje.

Plinsko tekućinska kromatografija uvedena je 1952. god. (A.T. James i Martin) za kemijske analize različitih smjesa spojeva, a ranih šezdesetih plinski kromatograf prvi put je primijenjen za identifikaciju plinova otopljenih u transformatorskom ulju.

Od sedamdesetih godina kromatografska analiza plinova otopljenih u ulju, ili izdvojenih iz transformatorskog ulja, intenzivno se koristi za određivanje koncentracije devet plinova, od kojih je sedam karakteristično za razgradnju materijala izolacijskog sustava transformatora, ulje – papir (vodik, metan, acetilen, etilen, etan, ugljični monoksid i ugljični dioksid).

Kromatografska analiza plinova iz uljnih transformatora, na temelju dugogodišnjeg iskustva, spada u red najosjetljivijih metoda za rano otkrivanje povećanih naprezanja u izolaciji ulje – papir, odnosno za utvrđivanje potencijalnog i već nastalog kvara. Često se također koristi za potvrdu ili otklanjanje sumnji koje proizlaze na temelju drugih mjerenja.

U cijelom svijetu velika pažnja posvećuje se nadgledavanju transformatora, od proizvodnje, prvih godina pogona i kasnije, kao i održavanje visoke sigurnosti pogona tijekom čitavog radnog vijeka, pogotovo kad se radi o jedinicama velikih snaga i napona ili ključnim po mjestu u elektroenergetskom sustavu.

Posljednjih godina intenzivno se radi na usavršavanju sustava on-line monitoringa i ekspertnim sustavima za kontinuirano praćenje stanja sa simultanom obradom podataka i prilagođavanjem režima rada stvarnom stanju objekata. Pogonski plinski detektori proizvode se u više izvedbi, koje omogućavaju on-line praćenje od jednog do devet plinova u plinskom jastuku iznad ulja ili u samom ulju.

Laboratorijska metoda kromatografske analize plinova iz uzoraka ulja ili plina iz transformatora u pogonu normizirana je metoda [1], dopunjena normom [2], koja se odnosi na analizu plinova kod prijemnih ispitivanja novih transformatora. Propisani su uvjeti ispitivanja i granice osjetljivosti i ponovljivosti. Sve faze analize svakodnevno se provjeravaju, jer moraju biti pod kontrolom ispitivača. Metoda [1] koristi se također za verifikaciju rezultata i kalibraciju pogonskih plinskih detektora, koji moraju postizati rezultate sljedeće prema normiziranoj metodi.

Metode interpretacije uvodile su se i razvijale sa sve većim brojem ispitivanja na modelima i realnim objektima, pojedine su autorizirane, a iz više različitih metoda izrađena je norma [4], koja se upravo obnavlja. Općenito govoreći, metode definiraju ključne parametre za prepoznavanje mehanizma degradacije, odnosno općeg uzroka povećanog naprezanja. Koriste se omjeri karakterističnih plinova, međusobni odnosi pojedinih ugljikovodika i grupa plinova, ukupni sadržaj gorivih plinova, brzina i porasta plinova u određenom vremenu.

Iz IEC dokumenata i raspoložive literature, očigledno je da pitanje normalnih vrijednosti nije jednoznačno i da se u jednom općevažećem dokumentu ne mogu definirati. Za to je potrebna vlastita baza podataka, podjela transformatora prema starosti, vrsti i konstrukcijskim specifičnostima, važnosti u mreži, te pažljiva procjena svakog pojedinog objekta i analize.

U članku su objašnjeni osnovni pojmovi vezani uz porijeklo plinova u uljnim transformatorima, metode ispitivanja i interpretacije rezultata mjerenja, na temelju novije literature, izvještaja radne grupe IEC za razradu i reviziju metoda kromatografske analize i vlastitih iskustava ispitivanja energetskih transformatora.

2. PORIJEKLO PLINOVA U TRANSFORMATORU

Tijekom rada transformatora izolacijski materijali su izloženi električkim, termičkim i mehaničkim naprezanjima, koja dovode do postupne degradacije i starenja, čija brzina neposredno ovisi o temperaturi i sadržaju kisika u ulju. Dozvoljena naprezanja u transformatoru propisana su, čime su osigurani normalna brzina starenja i planirani vijek trajanja transformatora.

Kod povećanih naprezanja izolacijski materijali izloženi su djelovanju veće količine energije, koja dovodi i do povećane degradacije materijala ulje – papir. Posljedica je ubrzana kemijska razgradnja materijala, stvaranje plinovitih i drugih produkata, lokalno ili opće oštećenje izolacije, smanjenje pogonske sigurnosti, te konačno kvar ili havarija. Tijekom rada troši se vijek trajanja, i transformator nakon određenih godina pogona ulazi u fazu smanjene pouzdanosti i povećane vjerojatnosti kvara.

Mineralno transformatorsko ulje sastoji se od različitih molekula ugljikovodika, koji sadrže kemijske grupe ugljika i vodika, $-CH_3$, $-CH_2$ i $-CH$ međusobno povezane C – C vezama. Kao posljedica električnih i termičkih kvarova može doći do kidanja nekih C - H i C – C veza, uz stvaranje malih nestabilnih dijelova, radikala ili iona, kao i mnogih drugih složenih oblika. Svi se oni brzo pregrupiraju u molekule plinova, vodika (H_2), metana (CH_4), etana (C_2H_6), etilena (C_2H_4) ili acetilena (C_2H_2). Mogu nastati i plinovi s više ugljikovih atoma u molekuli (C_3 i C_4), krute čestice ugljika (grafit) i polimeri ugljikovodika (X – vosak). Nastali plinovi se otpe u ulju ili, ako se stvaraju brzo u većim količinama, izdvajaju iz ulja kao slobodni plin.

Energije koje razaraju molekule ulja mogu se grupirati u sljedeće razine:

- niska energija kao što su parcijalna izbijanja tipa hladne plazme izazivaju preko reakcija ionizacije kidanje najslabijih C-H veza (338 kJ/molu) i stvaranje velike količine vodika;
- veće energije i/ili više temperature potrebne su za kidanje veza C-C i njihovu pretvorbu u plinove s jednostrukom vezom C-C (607 kJ/molu); zatim dvostrukom C=C (720 kJ/molu) ili trostrukom C≡C (960 kJ/molu).

Temperaturna granica za prevagu etilena u odnosu na metan i etan je npr. oko 500 °C. Acetilen nastaje kod najmanje 800 do 1200 °C. U području između 500 i 800 °C nastaju i čestice ugljika, koje su uočljive u ulju nakon električnog luka ili oko vrlo vrućih točaka.

Kruta celulozna izolacija (papir, prešpan, komadi drveta) sastoji se od polimernih lančanih molekula građenih od velikog broja jediničnih prstenova glukoze. Slabe molekulske C-O veze u celulozi i kemijske veze unutar glukoze termički su nestabilnije od kemijskih veza ugljikovodika ulja i razgrađuju se kod nižih temperatura. Značajna je brzina kidanja polimernih lanaca kod temperatura iznad 105 °C, uz potpunu razgradnju i karbonizaciju iznad 300 °C. Uglavnom nastaju ugljični monoksid i dioksid, te voda, u znatno većim količinama nego kod oksidacije ulja kod iste temperature. Nastaju također spojevi furana i neznatne količine ugljikovodika. Analiza furana provodi se prema metodi [3] i dobra je dopuna kromatografskoj analizi plinova kad se procjenjuje intenzitet degradacije celulozne izolacije. Sadržaj CO i CO₂ povećavaju se s temperaturom, sadržajem kisika u ulju i sadržajem vode u izolaciji.

Plinovi u ulju ne znače uvijek greške u izolacijskom sustavu transformatora. U nekim slučajevima oni mogu nastati i kao produkt korozije i drugih kemijskih reakcija na površini čelika, nezaštićenih metalnih površina ili zaštitnih prevlaka (AKZ). Unutarnje prevlake transformatora, kao što su alkidne boje i modificirani poliuretani koji sadrže masne kiseline, također mogu razvijati plinove. Ovakve pojave međutim nisu česte i mogu se najpouzdanije otkrivati plinsko kromatografskom analizom na novoj opremi, prije stavljanja pod napon ili testovima kompatibilnosti materijala. Reakcijom čelika s vodom nastaje vodik, kad je u okolnom ulju prisutan kisik. Za takve reakcije nije neophodno da transformator bude pod naponom. Vodik se može stvarati i kod reakcije slobodne vode sa specijalnim prevlakama AKZ na metalnim površinama, ili kod katalitičkih reakcija nekih vrsta čelika s uljem, pogotovo kod povišenih temperatura kad ulje sadrži kisik. Vodik može dospjeti u čelik adsorpcijom prilikom proizvodnje ili zavarivanja, a zatim se polagano oslobađa u ulje. Nastaje također pri razgradnji tankog sloja ulja između pregrijanih limova jezgre kod temperatura od 140⁰C i više.

Nadalje, sekundarni uzroci plinova u ulju mogu biti i sljedeći:

- zaostali plinovi od starog kvara, ako kod sanacije transformatora ulje nije otplinjeno;
- atmosferska zagađenja;
- kvar motora za pumpanje ulja;
- transformator transportiran s CO₂.

3. METODA ODREĐIVANJA PLINOVA IZ ULJA

Za provođenje kromatografske analize plinova iz ulja važno je osigurati sljedeće faze:

- Reprezentativni uzorak ulja (plina)
- Izdvajanje plina iz ulja
- Analiza plina pomoću plinskog kromatografa (razdvajanje plinova; prepoznavanje vrste pojedinog plina; izračunavanje količine svakog plina)
- Interpretacija rezultata

3.1 Vrsta i reprezentativnost uzoraka

Reprezentativan uzorak je kontrolirano izdvojen dio veće količine materijala čije stanje predstavlja. Postupci uzimanja uzoraka opisani su u normi [1]. Ivdje postoje varijante, za koje se pojedini laboratoriji sami odlučuju.

Mjesta uzimanja uzoraka na transformatorima uvjetovana su konstrukcijskim izvedbama, odnosno smještajem ventila za uzimanje uzoraka, ispuštanje ili dopunjavanje ulja. Transformatorskim uljem punjeni su ne samo kotao i hladnjaci transformatora nego i kotao teretnog dijela regulacijske sklopke. Dobro opremljen transformator ima ventile za uzimanje uzoraka iz tri nivoa po visini kotla, a također i iz regulacijske sklopke i Buchholz releja.

Uobičajeno je uzimanje uzoraka ulja za redovnu kontrolu iz donjeg nivoa kotla, a tek kad se uzimaju kontrolni ili izvanredni uzorci, koristite se ostala raspoloživa mjesta.

Važno je naglasiti da se plinovi iz ulja razvijaju samo kad je transformator pod naponom, i da stajanjem plinovi postupno prelaze iz ulja u zračni prostor iznad ulja, a pri tome ih zamjenjuju komponente

zraka. Prema tome, reprezentativni uzorci za utvrđivanje stanja izolacijskog sustava transformatora u pogonu, bit će oni koji su uzeti dok je transformator u radu.

Kad se radi o izvanrednim pojavama s naglim razvijanjem plinova, ovisno o mjestu, intenzitetu i ukupnom sadržaju plinova u ulju, u početku je raspodjela plinova po volumenu ulja nejednolika, dok nakon izvjesnog vremena dolazi do izjednačenja. Zato je u pojedinim slučajevima korisno uzeti više uzoraka, na različitim mjestima, čim prije nakon uočene pojave, i ponovno nakon određenog kraćeg vremena.

Kod transformatora s otvorenim sustavom disanja dolazi s vremenom do gubitka plinova radi difuzije iz ulja u zračni prostor konzervatora, ili kao posljedica termičkih promjena volumena ulja, tako da stvarni sadržaj plina u transformatoru može biti nešto viši od mjenog. Nije međutim jasna veličina gubitaka plinova difuzijom, neki je autori smatraju zanemarljivom, prema drugima može biti značajna, ovisno o tipu transformatora. Moguće je mjerenjem koncentracije plinova u ulju iz konzervatora dobiti orijentaciju otplinjenog volumena. Značajni gubici plinova difuzijom mogu utjecati na promjene omjera plinova, normalnih vrijednosti i porast normalne brzine.

Za praćenje stanja na istom objektu važno je uspoređivati uzorke uzete na isti način, na istom mjestu, analizirati ih istom ispitnom metodom. Za istraživanje potencijalnih ili nastalih kvarova, uzimaju se uzorci na svim raspoloživim mjestima, a kod posebno osjetljivih analiza, kao što su ispitivanja kod novih transformatora, može biti važno da ispitivanje provodi isti ispitivač.

Važno je označavanje uzoraka s dovoljnim brojem podataka, za identifikaciju i interpretaciju rezultata mjerenja.

Uzorci na kojima se provodi kromatografska analiza plinova mogu se podijeliti na slijedeći način:

Etaloni (potvrđeni referencijski materijali i radni etaloni) podrazumijevaju materijale koji služe za kalibraciju i rekalkibraciju instrumenta, odnosno za provjeru rezultata ispitivanja. To su smjese plinova s poznatim udjelima pojedinog plina, pripremljene kod ovlaštenih proizvođača ili laboratorija, popraćene potvrđnicom (certifikatom). Po mogućnosti, udio pojedinog plina u kalibracijskoj smjesi treba biti što sličniji sastavu ispitivanog plina. Pojedini laboratoriji nastoje sami pripremiti radne etalone transformatorskog ulja s određenom količinom otopljenog plina, koji se analiziraju prema certificiranim etalonima, odnosno u više laboratorija. Svaki laboratorij također ima svoje interne kontrolne etalone, koji služe za češću provjeru pokazivanja instrumenta.

Referentni uzorci mogu biti uzorci ulja iz istog transformatora, prije stavljanja pod napon, uzorci prethodnih mjerenja, koji odgovaraju normalnom stanju, ili uzorci iz istovjetnih, paralelnih odnosno sličnih transformatora, a koji služe za usporedbu.

Početni uzorci uzimaju se prije stavljanja pod napon, prije nastavka pogona, nakon popravaka, prije praćenja neke pojave.

Kontrolni uzorci (ponovljeni) su oni koji se uzimaju istovremeno ili kratko vrijeme nakon planiranih, sa istog mjesta, za naknadnu provjeru ili dodatna ispitivanja, zatim uzeti s različitih mjesta, za provjeru distribucije plinova unutar ukupne mase ulja.

Uzorci za redovnu kontrolu uzimaju se u pravilnim odnosno dogovorenim vremenskim razmacima, u pravilu uvijek s istog mjesta i na jednak način,

Izvanredni uzorci uzimaju se neposredno nakon izvanrednih događanja u mreži, ispada transformatora proradom zaštite odnosno pojave plina u Buchholz releju.

Za uzimanje uzoraka propisano je korištenje staklenih šprica nepropusnih za plin, što se provjerava postupkom provjere brzine propuštanja vodika. U praksi se često koriste i metalne posude.

Staklene šprice volumena prilagođenog ispitnoj metodi dozvoljavaju promjenu volumena s temperaturom, propisane su normom [L1]. Nedostatak je relativno visoka cijena, lomljive su i traži se posebna ambalaža za transport. Ispitivanje treba provesti unutar određenog vremena. Potrebna je povremena provjera propusnosti.

Metalne posude sadrže veću količinu uzorka, dovoljno za sva ispitivanja. Pogodne su za korištenje u terenskim uvjetima, mogu se držati u pričuvi, nisu lomljive, zahtijevaju veću pažnju kod uzimanja uzoraka, uzorak nije vidljiv, pa se ne mogu zapaziti mjehuri plina, talozi ili druge važne vidljive promjene. Mogu se koristiti za dulje stajanje, nisu normizirane, zahtijevaju povremenu provjeru prema uzorcima uzetim špricom.

3.2 Ekstrakcija plinova iz ulja

U slučajevima kad se plinovi spontano izdvajaju iz ulja u Buchholz relej, uzima se uzorak plina i direktno analizira, bez prethodne pripreme.

Uzorci ulja moraju se najprije pripremiti za analizu i to tako da se plin izdvoji iz ulja. Postoji više metoda, od potpune i djelomične ekstrakcije u posebnim vakuumskim uređajima punjenim živom, zatim

automatske, kompjutorski vođene vakuumske ekstrakcije, istjerivanja plinova iz ulja inertnim plinom ("stripping") i metode uspostavljanja ravnotežnog stanja između plina i ulja ("head space").

Izbor metode ovisi o mogućnostima pojedinog laboratorija. Svaka od navedenih metoda ima svoje prednosti i nedostatke, ali je važno napomenuti da se kod uspoređivanja rezultata ispitivanja različitih laboratorija moraju uzeti u obzir i metode pripreme uzoraka, te da se za praćenje stanja i utvrđivanje brzine porasta plinova analize moraju provoditi na isti način.

3.3 Analiza plinova

Metoda plinske kromatografije jedina je pouzdana metoda za određivanje kemijskog sastava smjese plinova. Instrumenti su danas izvanredno osjetljivi, do razine milijuntog dijela jediničnog volumena. Pri analizi plinova otopljenih u ulju, dovoljno je odrediti devet plinova iz relativno male količine uzorka (nekoliko mikrolitara plina). Nekoliko različitih procedura koristi se za analizu plinova otopljenih u transformatorskom ulju. Uređaj za ekstrakciju plina može biti direktno povezan s jednim kromatografom, ili se ekstrakcija plinova provodi u odvojenom uređaju i plin injektira špricom u jedan ili više kromatografskih sustava. Kod striping metode vrlo mala količina ulja (0,25 do 5 mL) uvodi se u uređaj za istjerivanje plinova pomoću struje inertnog plina ("stripper") koji je priključen na ulazni ventil plinskog kromatografa. Ova metoda nema dovoljnu osjetljivost za ispitivanje kod novih transformatora. Kod metode "head space" provodi se djelomično termičko otplinjavanje ulja i nakon uspostavljanja ravnotežnog stanja između ulja i plina, analiziraju djelomično izdvojeni plinovi.

Nešto je drugačiji princip kod analizatora za on-line praćenje plinova u transformatoru. Senzor, koji je u direktnom kontaktu s uljem, ima polupropusnu membranu kroz koju prolazi dio plinova u elektrolitsku ćeliju, koja je u dodiru sa zrakom i pretvara naboj na elektrodi u električni signal. Druga verzija plinskih detektora, izvedenih za transformatore sa zatvorenim sustavom disanja, ima senzor neposredno u plinu iznad ulja, detektira vrstu i količinu plinova i preračunava na sadržaj plinova u ulju na temelju topivosti plinova kod određene temperature.

Metoda koju pojedini laboratorij odabire mora osiguravati granice detekcije i ponovljivost mjerenja koje zahtjeva norma.

U Laboratoriju za fizikalno-kemijska ispitivanja koristi se metoda potpune ekstrakcije plinova iz ulja u vakuumskom uređaju sa živom. Plinska bireta u kojoj se skuplja i odmjerava plin izdvojen iz ulja direktno je spojena na ulazni ventil plinskog kromatografa. Plin za analizu ubacuje se u struju inertnog plina, prolazi kroz kolone punjene selektivnim adsorbensima na kojima se razdvaja u komponente tako da u detektore dolaze pojedinačni plinovi u točno određenim vremenskim razmacima. Rezultat analize je kromatogram, koji je određen na apsisci vremenom pojavljivanja plina u detektoru a na ordinati visinom električnog signala. Vrijeme je prema tome kvalitativna karakteristika pojedinog plina, a površina ispod krivulje proporcionalna je količini. Umjeravanje se provodi pomoću etalonskih uzoraka.

3.4 Interpretacija rezultata ispitivanja

Na temelju rezultata analize plinova moguće je dijagnosticirati tri temeljna uzroka degradacije izolacije, koji su prema [5] podjeljeni na šest tipičnih grešaka, sa sljedećim vidljivim posljedicama:

- **parcijalna izbijanja** (PD) tipa korone izazivaju taloženje X-voska na papirnoj izolaciji, a ako je prisutno slabo iskrenje, nastaju rupice veličine vrha pribadače, karbonizirana rupičavost papira, koji se ponekad teško pronaze;
- **izbijanja male energije** (D1), iskrenje u ulju i/ili papiru, vidljiva su većim karboniziranim perforacijama papira, karbonizacijama površine papira ("tracking") ili česticama ugljika u ulju (kao u kotlu teretnog dijela sklopke);
- **izbijanja velike energije** (D2), električni luk podržavan mrežom, u ulju i /ili papiru, prepoznatljiv je kao veliko razaranje i karbonizacija papira, s tragovima taljenja metala na krajevima izbijanja, izraženom karbonizacijom ulja, a u nekim slučajevima rezultiraju ispadom transformatora.
- **termički kvar**, lokalno ili opće pregrijavanje u ulju i papiru, do 300 °C (T1), kad je papir smeđkast,
- **termički kvar**, u ulju i papiru, iznad 300 °C (T2), kad je karboniziran;
- **termički kvar** temperatura iznad 700°C (T3), još nije izražena karbonizacija ulja; kod promjene boje metala radi se o 800°C, a taljenje metala nastaje iznad 1000°C.

Često se događa da jedna pojava prelazi u drugu, ili se dvije pojave događaju istovremeno.

Dodatne informacije dobivaju se iz sadržaja i omjera ostalih analiziranih plinova:

Plinovi nastali razgradnjom celuloze kod normalnog starenja su CO₂ / CO u omjeru 3 – 10. Kod visokih temperatura brže se stvara CO, pa je kod omjera manjeg od 3 visoka vjerojatnost da je došlo do

oštećenja papira i eventualno karbonizacije. Prije računanja omjera CO_2 / CO treba provesti korekciju za udio CO_2 iz zraka i odbiti plinove nastale normalnim starenjem. Kod transformatora sa zatvorenim sustavom disanja, može doći do propuštanja zraka, što utječe na povećanje koncentracije CO_2 .

Kisik i dušik iz atmosfere otapaju se u ulju kod normalnog tlaka zraka do 10 % vol. ulja, od toga je približno 3 % kisik, 7 % dušik, a CO_2 iznosi do 300 $\mu\text{L/L}$. Normalni omjer O_2/N_2 približno je 0,5. Smanjeni omjer može biti znak povećanog utroška kisika kod ubrzanog starenja.

U tablici I. je pregled metoda interpretacije koje se najčešće koriste. Koja će se metoda koristiti u nekom laboratoriju ovisi o autoru, tradiciji, potvrdi iz prakse. Često se radi usporedbe i provjere koristi nekoliko metoda interpretacija [6] .

Tablica I. Pregled različitih metoda interpretacije kromatografske analize plinova

Naziv metode	Ključni plinovi za interpretaciju	Napomena
IEC60599/78.[4]	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$; CH_4/H_2 ; $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ dodatno CO_2/CO ;	normalne vrijednosti nisu definirane; nije definirana vrsta opreme;
Prijedlog revizije IEC 60599/98.[5]	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$; CH_4/H_2 ; $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ dodatno CO_2/CO ; dodatno furani ;	normalne vrijednosti nisu definirane - naveden je raspon vrijednosti velikog broja obrađenih podataka; data je samo osnovna podjela vrste opreme;
Rogers[7]	CH_4/H_2 ; $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$; $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$; $\text{C}_2\text{H}_2/ \text{C}_2\text{H}_4$ dodatno CO ;	Najranija metoda, na bazi statističke obrade više od 10.000 analiza i nađenih kvarova Određuje 12 vrsta grešaka Često se javlja složena greška
Dornenburg[8]	ključne komponente i njihove relativne koncentracije Omjeri: CH_4/H_2 ; $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$; $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$; $\text{C}_2\text{H}_2/ \text{CH}_4$	utvrđuje tip općeg problema - tri vrste naprezanja
Duval[9]	postotni udjeli tri plina C_2H_2 ; C_2H_4 ; CH_4 u odnosu na njihovu sumu (vrhovi trokuta = 100% plina)	utvrđuje šest vrsta naprezanja prikazanih kao zone u grafičkom prikazu na bazi udjela plinova
Doble Engineering [6]	ključni plinovi H_2 ; C_2H_2 ; C_2H_4 ; CO kriterij: $\sum \text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$	Utvrđuje ozbiljnost i vrstu problema - određuje trend
ANSI/IEEE C57.104-1978.[10]	Kriterij normalnih vrijednosti izračunatih iz normalne raspodjele za 90%-tnu vjerojatnost	Normirane su normalne vrijednosti, ali bez zakonske obaveze

3.4.1 Pojmovi važni za interpretaciju rezultata

Rezultati analize plinova u ulju se iskazuju koncentracijom, tj. omjerom volumena plina, μL , sadržanog u 1 litri ulja ($\mu\text{L/L}$). Kod kemijskih analiza plinova koncentracija se izražava kao volumski postotni udio (vol. %). Izražavanje sadržaja plinova u 1 L ulja ne daje uvid u ukupnu količinu plinova nastalih na mjestu kvara. Za ocjenu stanja može biti korisno preračunati sadržaj plina na ukupnu količinu ulja u transformatoru. Ako analizom neki plin nije nađen, korektno iskazivanje rezultata je: "ispod granice detekcije za dotični plin", ili npr.: ND (nije detektiran).

Osjetljivost metode (S) definirana je kao visoka sposobnost detekcije ((95 %-tna vjerojatnost) vrlo niskih koncentracija plina ($<10\mu\text{L/L}$). Mjera za osjetljivost je granica detekcije za svaki pojedini plin. [1]

Normalne vrijednosti koncentracija definirane su kao prihvatljivi sadržaji plinova ispod kojih je vrlo mala vjerojatnost prisutnosti greške u izolacijskom sustavu ulje – papir. Vrijednosti normalnih

koncentracija izračunate na razini 90 % -tne statističke vjerojatnosti znače da se s 90% -tnom sigurnosti stanje može ocijeniti kao normalno.

Vrijednosti normalnih koncentracija imaju značenje početnih pokazatelja i treba ih promatrati kao vrijednosti upozorenja pri donošenju odluke, kad nema nikakvog drugog iskustva i prethodnih ispitivanja. One se ne mogu koristiti za određivanje da li ima ili nema greške.

Vrijednosti normalnih koncentracija ovise o brojnim faktorima: vremenu od početka pogona ili zadnjeg pregleda, tipu transformatora, prirodi greške (električna ili termička), izvedbi zaštite ulja, opterećenju, naponu, režimu rada i utjecajima iz mreže. Izračunavaju se za određene tipove transformatora iz svih rezultata plinskih analiza koje odgovaraju stanju bez greške odnosno kvara, statističkom obradom normalne raspodjele za razinu 90 %-tne vjerojatnosti.

Za primjenu je važno naglasiti, ako se odaberu preniske granice normalnih vrijednosti, postoji opasnost da se sumnja u ispravnost prevelikog broja opreme, što može dovesti u pitanje kredibilitet interpretacije i preporuka, i izazvati porast troškova održavanja. Ako su pak normalne vrijednosti previsoke, može doći do kvara bez prethodnog upozorenja, uz još veće troškove. Izbor normalnih granica često je stručna procjena, koja ovisi o prethodnom iskustvu sa sličnim jedinicama.

Vrijednosti za uzbunu su koncentracije iznad kojih je vjerojatnost ispada ili kvara dovoljno visoka da se zahtijeva hitna odluka, odnosno aktivnost odgovornih službi. Ove vrijednosti mogu postaviti proizvođači, korisnici ili nezavisni specijalisti, ovisno o prethodnom iskustvu sa sličnom opremom.

Brzina porasta plinova (trend) izražava se na mjesec, dan ili sat, ovisno o slučaju. Normalna brzina porasta plinova značajno ovisi o vrsti transformatora, starosti, vrsti nađenog naprezanja, izvedbi sustava disanja, promjenama opterećenja i ukupnoj količini izolacije u transformatoru.

Ako od prethodne analize s povećanim plinovima nema porasta koncentracija, postoji vjerojatnost da je naprezanje prestalo, ili je manjeg opsega, koji je u slučaju transformatora s otvorenim sustavom disanja kompenziran gubicima plinova difuzijom kroz konzervator. Porast koncentracija od 10 % mjesečno iznad normalnih vrijednosti, obično se smatra značajnim odstupanjem. Ako se brzina poveća isto toliko na tjedan, ili promjene plinova ukazuju na porast energije, stanje se ocjenjuje kao vrlo ozbiljno, pogotovo ako su prekoračene vrijednosti za uzbunu.

Kad se pomoću on-line detektora utvrdi porast plina, potrebno je odmah provesti laboratorijsku plinsku kromatografsku analizu za provjeru količine, procjenu brzine porasta plinova i identifikaciju odstupanja.

Izračunavanje omjera plinova značajno je, a u pravilu se primjenjuje ako je koncentracija najmanje jednog plina iznad normalnih vrijednosti i iznad normalne brzine porasta koncentracija. Kod analiza koje se provode u prekratkim vremenskim razmacima, moguće su neočekivane razlike kao posljedica uzimanja uzoraka ili analitičkih rasipanja, što treba eliminirati prije izračunavanja. Ako se dobivaju omjeri plinova različiti nego kod prethodnih analiza, moguće je razvijanje novog oštećenja uz postojeće, ili je u pitanju promjena brzine starenja. U tom slučaju treba odbiti vrijednosti prethodne analize i izračunati omjere razlika plinova. Ovo naročito vrijedi za CO i CO₂. Važno je uspoređivati uzorke uzete na istom mjestu i dok ulje cirkulira. Promjenu koncentracija i omjera treba očekivati nakon obrade ulja. Posebno treba paziti kod izračunavanja omjera niskih koncentracija (manje od 10 x S), kad je moguća razlika u rezultatima i radi smanjene preciznosti.

4. POSTUPAK INTERPRETACIJE PLINOVA

Postupak interpretacije nije normiziran, ali se s vremenom iskristalizirao redoslijed obrade podataka kromatografske analize plinova iz transformatora:

- 4.1. Mjerni rezultati se prihvaćaju, korigiraju ili odbacuju.
- 4.2. Usporede se s prethodnim rezultatima i izračuna brzina porasta plinova.
- 4.3. Ako su svi plinovi ispod normalnih vrijednosti, a brzina porasta plinova ispod normalne, stanje se ocjenjuje kao normalno.
- 4.4. Ako je najmanje jedan plin iznad normalnih vrijednosti, i povećana je brzina porasta plinova, izračunaju se omjeri plinova prema korištenoj metodi i utvrdi moguća greška. Provjeri se ispravnost rezultata istom i eventualno drugim metodama.
- 4.5. Ako je potrebno, odbije se prethodna analiza i omjeri izračunaju iz razlike, posebno za CO i CO₂.
- 4.6. Odredi se da li su vrijednosti iznad koncentracija za uzbunu, da li se moguća greška razvila prema većim energijama i da li je uključena razgradnja papira.
- 4.7. Ako su normalne vrijednosti predviđa se redovna kontrola.
- 4.8. Ako su vrijednosti povećane češća je kontrola, tj. nakon 1, 3, 6 mj.,

4.9. Značajno prekoračenje vrijednosti podrazumijeva daljnje aktivnosti među kojima su i proširenje ispitivanja (spojevi furana, ostala ispitivanja ulja i električka ispitivanja transformatora).

5. PRIMJERI IZ PRAKSE

5.1 Ispitivanje novih transformatora

Iako je primarno kromatografska analiza namijenjena za kontrolu transformatora u uvjetima pogona, nakon dovoljno iskustava nastojalo se proširiti primjenu metode i na ispitivanja transformatora prije, tijekom i nakon završnih ispitivanja transformatora kako bi se otkrile greške koje nisu uočljive klasičnim metodama. Kromatografska analiza posebno se pokazala uspješnom nakon ispitivanja zagrijavanjem, udarnim naponom i u praznom hodu, a koristi se za potvrdu da transformator nema skrivenu grešku. Kromatografska analiza se je kod kratkotrajnih dielektričnih ispitivanja pokazala manje osjetljiva od električnih mjerenja.

Tijekom tvorničkog ispitivanja transformator je kratko vrijeme pod naponom, pa se razvijaju vrlo male količine plinova. Za nove transformatore normizirana je metoda [2] s nižim granicama detekcije (zahtijeva se 10 puta veća osjetljivost određivanja ugljikovodika u odnosu na transformatore u pogonu) i dobrom preciznošću, za što je važno da se svi uzorci analiziraju u istom laboratoriju, a da analizu izvode isti, iskusni ispitivači.

Tijekom zadnjih deset godina u Laboratoriju za fizikalno-kemijska ispitivanja Končar-Instituta za elektrotehniku provedeno je oko 250 analiza plinova iz ulja novih transformatora tijekom tvorničkih ispitivanja transformatora. Ispitivanja se odnose na energetske transformatore napona 24 kV do 420 kV. Koncentracije plinova kod ulja iz novih energetskih transformatora nakon naponskih ispitivanja i nakon pokusa zagrijavanja bile su u skladu s tipičnim vrijednostima navedenim u normi [2]. U tablici II. navedeni su rasponi koncentracija izmjereni kod novih transformatora, usporedno s preporučenim kriterijima [2].

Primjeri navedeni u tablici III. odnose se na značajna odstupanja koncentracija plinova u odnosu na tipične vrijednosti, koji su dijagnosticirani kao mogući kvar. Kod otvaranja transformatora kvarovi su nađeni.

Tablica II. Raspon koncentracija plinova ($\mu\text{L/L}$) za nove energetske transformatore

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
nakon naponskih ispitivanja	0,1- 14	0,1- 2	0,1-1	0,1-1,7	0,1-0,8	2 - 40	30 -175	500 - 6500	3000 - 15000
nakon testa zagrijavanja	0,1- 14	0,1- 2,7	0,1-0,8	0,1-1,7	0,1-2	2 - 40	36 -193	500- 6500	3000- 15000
tipične vrijedn. IEC 61181/93	15	5	1	2	5	80	200	3000	10000

Tablica III. Odstupanja plinova ($\mu\text{L/L}$ ulja) potvrđena kod otvaranja novih energetskih transformatora

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	Šifra prema IEC 60599	Nađen kvar
NAKON NAPONSKIH ISPITIVANJA									
Primjer 1	30	4	11	1,4	0,1	10	74	2 0 2	električni proboj kroz ulje
Primjer 2	53	5	22	5	0,3	16	50	2 0 2	električni proboj kroz ulje
NAKON TESTA ZAGRIJAVANJA									
Primjer 3	25	31	0,8	39	5,4	13	174	0 2 2	lokalno pregrijavanje limova jezgre

5.2 Ispitivanje transformatora u pogonu

Redovno praćenje transformatora u pogonu kromatografskom analizom plinova otopljenih u ulju pokazalo se neophodnim za utvrđivanje normalnog stanja i pravovremenu procjenu vrste i veličine odstupanja od normale. Ako nema rezultata prethodne analize ni podataka koji se mogu primijeniti na dati tip transformatora, provodi se praćenje kroz određeno vrijeme, a za orijentaciju se koriste raspoložive vrijednosti normalnih koncentracija za slične transformatore.

U prijedlogu radne grupe IEC za reviziju metode interpretacije dat je raspon 90% -tnih normalnih vrijednosti za energetske transformatore, dobiven obradom podataka više od 15 000 energetskih transformatora u približno 15 elektroenergetskih organizacija širom svijeta. Transformatori su podijeljeni samo u dvije grupe, bez i s OLTC (regulacija napona pod opterećenjem). Raspon normalnih vrijednosti naveden je u tablici IV. [3].

Naše iskustvo pokazuje da je ovakva podjela previše pojednostavljena, i da bitnu ulogu ima vrsta i izvedba transformatora i regulacijskih sklopki.

Tablica IV. Raspon normalnih vrijednosti (90 %-nih) za energetske transformatore [5]
(Koncentracije plinova iskazane su u $\mu\text{L/L}$)

	VODIK	METAN	ACETILEN	ETILEN	ETAN	CO	CO ₂
Bez OLTC	60 -150	40 -110	3 - 50	60 - 280	50 -90	540 - 900	5100 -13000
S OLTC	75 -150	35 -130	80 - 270	110 - 250	50 -70	400 - 850	5300-12000

Za ilustraciju prikazan je primjer dijagnoze, sa sumnjom na kvar i nađenim kvarom, kod energetskog transformatora 400 MVA, kod kojeg vrijednosti nisu značajno odstupale od normalnih. Ovaj primjer potvrdio je važnost redovitog praćenja, ponovljenih i kontrolnih ispitivanja, uzimanja što većeg broja uzoraka nakon prorade zaštite, odnosno neposredno nakon izvanrednih događanja.

Tablica V. Primjer odstupanja kromatografske analize kod kvara (Koncentracije plinova su u $\mu\text{L/L}$)

Datum	Nivo	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	Napomena
04.09.91.	D	13	6	0	9	2	430	2200	REDOVNA KONTROLA - NORMALNO STANJE
11.08.92.	S	14	5	0	8	2	440	2245	
09.07.93.	D	18	9	1	9	3	500	2480	
20.10.94.	S	11	6	1	10	1	400	2420	
30.11.95.	S	13	5	2	12	2	440	2580	4.01. – alarm Buch
04.01.96.	Buch	512	9	12	16	2	430	3510	
05.01.96.	D	34	6	11	15	2	500	3860	4 h - prazni hod
18.01.96.	Buch	468	17	14	14	1	380	2720	
18.01.96.	D	48	7	15	14	1	390	2855	NORMALNO STANJE
07.05.96.	S	<1	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	3	530	
14.10.98.	D	15	4	<0,1	7	<0,1	315	1330	

U navedenom primjeru radilo se o transformatoru koji je redovito praćen, a analize su odgovarale vrijednostima koje su se dobivale na istim tipovima transformatora (normalno stanje).

Neposredno nakon signala Buchholza, koji se dogodio oko 1,5 mj. nakon redovne kontrole, uzeti su uzorci za izvanrednu analizu, ulje iz Buchholza i donjeg nivoa kotla. Dobiven je povećan acetilen (apsolutna vrijednost relativno niska), a u ulju iz Buchholza znatno viši vodik. Postavljena je sumnja na električno izbijanje (iskrenje) u ulju, bez učešća celulozne izolacije. Ponovljena su ispitivanja nakon dva tjedna, nakon što je trafo držan u praznom hodu 4 sata. Ponovljeni uzorci iz istih mjesta potvrdili su prisutnost pojave, iskrenja u ulju, uz pretpostavku lokacije - gornji dio transformatora. Otvaranjem na terenu nađeno je iskrenje na zaštitnom ekranu provodnog izolatora. Kvar je popravljen i otklonjen, što je potvrdila kontrolna analiza i kasnije analize redovnog praćenja.

6. ZAKLJUČAK

Analiza plinova otopljenih ili oslobođenih iz transformatorskog ulja jedna je od najvažnijih dijagnostičkih metoda za utvrđivanje stanja izolacijskog sustava transformatora u pogonu, a sve više se koristi i kod završnih ispitivanja novih transformatora. Kvalitetna analiza i interpretacija rezultata zahtijevaju visoku osjetljivost i ponovljivost analitičkog postupka, što je moguće postići samo pomoću sofisticirane laboratorijske opreme, kontrole mjernog procesa u svim fazama (od uzimanja uzoraka do završne obrade rezultata) i specijaliziranih ispitivača. Metode interpretacije rezultata neprekidno se dograđuju, ali zapravo podrazumijevaju posjedovanje vlastite baze transformatora, veliki broj mjerenja na različitim tipovima transformatora u širokom rasponu normalnog pogona i kvarova.

Dodatni podaci, koji mogu doprinjeti boljem uvidu u stanje transformatora, mogu se dobiti određivanjem sadržaja furana u ulju i korištenjem uređaja za on-line praćenje, kad za to postoje opravdani razlozi.

LITERATURA

- [1] IEC 60567 (1992): Guide for sampling of gases and oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases.
- [2] IEC 61181 (1993): Impregnated insulating materials; application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment
- [3] IEC 61198 (1993): Mineral insulating oil – Method for determination of 2-furfural and related compounds.
- [4] IEC 60599 (1978): Interpretation of the analysis of gases in transformers and other filled electrical equipment in service.
- [5] DRAFT, Revision of IEC 60599 (1998): Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis.
- [6] S.D.Myers, J.J.Kelly, R.H. Parrish: A guide to transformer maintenance, TMI (Transformer Maintenance Institut), 1983.
- [7] R.R.Rogers: UK Experience in the Interpretation of Incipient Faults in Power Transformers by Dissolved Gas-In-Oil chromatographic Analysis”, Doble Client Conference 1975 Paper 42 AIC 75.
- [8] E. Dornenburg, W. Strittmatter: Monitoring oil cooled transformers by gas analysis, Brown Boveri Review, vol 61, may 1974.
- [9] M. Duval: Fault Gases formed in Oil-Filled breathing EHV Power Transformers – Interpretation of Gas Analysis Data, IEEE PES Conference paper No. C74 476-8 (1974)
- [10] ANSI/IEEE C57.104-1978: IEEE Guide for the detection and determination of generated gases in oil-immersed transformers and their relation to the serviceability of the equipment