

SPECIFIČNOSTI RADA I DIJAGNOSTIKA TRANSFORMATORA SA REGULATOROM NAPONA

S. Teslić, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija
Đ. Jovanović,
B. Bošković,
V. Radin,
J. Lukić

Kratak sadržaj: Regulator napona (RN) je značajan element prenosne mreže zbog osnovnog zahteva da obezbedi konstantan izlazni napon iz transformatora, a tokom svog rada izložen je povećanim električnim i mehaničkim stresovima. U radu je dat osvrt na specifičnosti funkcionisanja i konstrukcije regulatora napona što uslovljava složeniju analizu pogonskog stanja gasnohromatografskom analizom ulja. U cilju primene adekvatne dijagnostike pogonskog stanja transformatora sa regulatorom napona, urađena je statistička analiza rezultata baze podataka gasnohromatografske analize gasova rastvorenih u ulju 110 kV transformatora sa RN, prenosne i distributivne mreže Srbije (baza podataka Elektrotehničkog Instituta „Nikola Tesla“) čime je definisan opseg dozvoljenih koncentracija gasova kvara za 95 % nivo pouzdanosti. Dat je osvrt na dodatne analize ulja RN koje mogu biti značajne u analizi rada RN. Takođe je istaknut značaj gasnohromatografske analize ulja samog regulatora. Dati su principi dijagnostike sa opisom fenomena koji se odigravaju u ulju tokom rada regulatora napona.

Ključne reči: regulator napona, dijagnostika, gasnohromatografska analiza, transformatorsko ulje

1. UVOD

Regulator napona (RN), kao mehanički deo, predstavlja jednu od najosetljivijih komponenti energetskih transformatora (ET).⁽⁶⁾ Veliki udeo u održavanju ET predstavlja održavanje RN (prema nekim autorima čak oko 50%).⁽⁴⁾ S druge strane značajan deo kvarova na transformatorima je direktno ili indirektno vezan za kvarove na RN. Zbog toga njegova preventivna kontrola ima značajno mesto u dijagnostici transformatora.

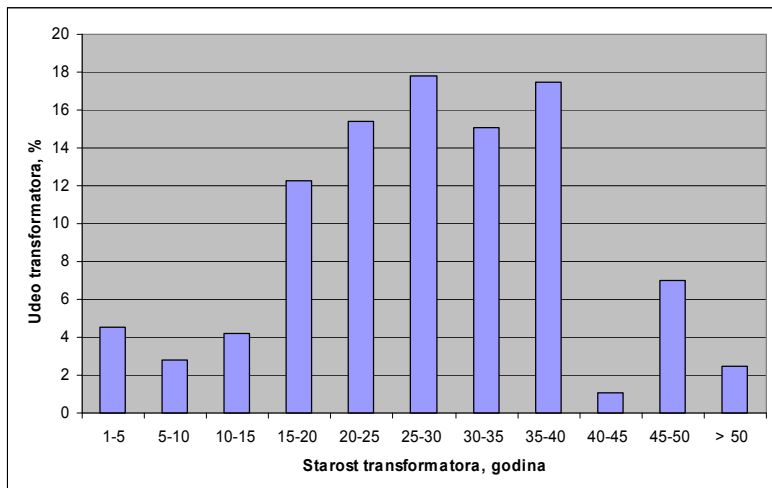
Postoje različiti tipovi i konstrukcije regulatora. Mogu se razlikovati prema načinu premošćenja (otpornik, prigušnica, vakuum), lokaciji prekidačkog dela (u zasebnom sudu, u glavnom sudu transformatora), načinu disanja (zapečaćeni, sa potpunim ili delimičnim ovazdušenjem) itd.

Kod ET prenosnih i distributivnih mreža regulator napona (prekidački deo) je uglavnom u zasebnom sudu. U cilju boljeg razumevanja fenomena koji nastaju tokom rada, neophodno je osvrnuti se na samu konstrukciju RN koji se sastoji iz nekoliko delova:

1. biračkog dela koji je konstruisan da provodi struju, ali ne i da je prekida i uključuje, tako da pri njegovom normalnom radu nema varničenja ili luka, pa se on smešta u glavni sud transformatora

2. prekidačkog dela koji provodi, prekida i uključuje struju, tako da u tom delu dolazi do pojave luka, varničenja i visoke temperature što je praćeno stvaranjem visokih koncentracija gasova i karbonizacijom ulja, pa je neophodno da se nalazi u posebnom sudu koji je zaptiven prema glavnom sudu transformatora,
3. upravljačkog ormarića regulatora sa motornim pogonom i prenosnim mehanizmom.⁽²⁾

RN se smatra slabom tačkom iz više razloga: postojanje kompleksnih mehaničkih komponenti, prisustvo visokih struja i napona, postojanje pomičnih električnih kontakata, nemogućnost pregleda u pogonu. Glavni uzroci kvara na RN su mehanički kvarovi, erozija kontakata i koksovanje kontakata



(stvaranje taloga karbonizovanog ulja preko kontakata). Sa porastom starosti transformatora, povećava se rizik od pojave kvara na RN zbog izraženije degradacije u odnosu na statičke delove transformatora. Prosečna starost 110 kV transformatora u prenosnoj i distributivnim mrežama Republike Srbije, prema podacima Elektrotehničkog Instituta „Nikola Tesla“, je oko 30 godina što iziskuje veću pažnju u održavanju i dijagnostici. U dijagramu 1. prikazana je procentualna raspodela transformatora prema godinama pogona (starosti).

Dijagram 1. Starost 110 kV transformatora prenosne i distributivne mreže Srbije

2. METODE PREVENTIVNE KONTROLE TRANSFORMATORA – UTICAJ PRISUSTVA RN

Preventivna kontrola transformatora sa regulatorom napona je veoma značajna, naročito uz činjenicu o velikoj prosečnoj starosti. Program preventivne kontrole ET, za sada, obuhvata niz električnih, hemijskih i termovizijskih metoda ispitivanja:

- Merenje otpora izolacije, uz određivanje polarizacionih indeksa,
- Merenje faktora dielektričnih gubitaka i kapaciteta izolacije namotaja i provodnih izolatora,
- Merenje induktivnosti usled rasipanja,
- Merenje struja i gubitaka praznog hoda pri niskom naponu,
- Merenje omskih otpora namotaja,
- Snimanje frekventnog odziva metodom SFRA,
- Merenje povratnog napona metodom RVM,
- Gasnohromatografska analiza sadržaja gasova rastvorenih u ulju,
- Merenje sadržaja vode i derivata furana rastvorenih u ulju,
- Ispitivanje fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja,
- Termovizijski pregled transformatora i provodnih izolatora.⁽²⁾

Stanje RN utiče na rezultate skoro svih metoda ispitivanja transformatora (izuzev merenja na provodnim izolatorima, merenja povratnog napona, merenja sadržaja furana i vode rastvorenih u ulju i ispitivanja karakteristika ulja iz glavnog suda transformatora). Rezultati većine električnih merenja zavise od pozicije RN pri kojoj se vrše ispitivanja, tako da se posredno mogu videti promene na kontaktima regulatora.

Značajna metoda kontrole pogonskog stanja transformatora je gasna hromatografija (GH) gasova rastvorenih u transformatorskom ulju jer omogućava praćenje transformatora dok je u pogonu. Detektovani gasovi nastaju kao posledica degradacije ulja pod uobičajenim pogonskim uslovima ili u režimu kvara. Na osnovu vrednosti koncentracija nastalih gasova i njihovih međusobnih odnosa procenjuje se pogonska ispravnost transformatora, odnosno dijagnostikuje eventualno prisustvo i vrsta kvara. Analiza ulja iz glavnog suda transformatora najčešće daje malo informacija o radu regulatora napona zbog odvojenosti ulja glavnog suda i suda RN. Pri normalnom radu regulatora dolazi do produkcije gasova karakterističnih za pojavu luka kroz ulje – acetilena (C_2H_2) i vodonika (H_2). U nekim slučajevima gasovi nastali u sudu RN mogu preći u glavni sud transformatora zbog oštećenih barijera ili difuzijom kroz sud konzervatora u slučaju da nije potpuno pregrađen nepropusnom pregradom. Tada dolazi do prelaska (difuzije) gasova iz suda regulatora u glavni sud transformatora što utiče na

rezultate GH ulja glavnog suda (izmerene koncentracije su više nego što realno nastaju usled rada transformatora) i maskiranja stvarnog stanja transformatora.

Zbog specifičnosti konstrukcije i rada transformatora sa RN, a u cilju definisanja okvirnih graničnih vrednosti pojedinačnih koncentracija gasova koji nastaju u ulju, urađena je statistička analiza rezultata GH ulja glavnog suda, 110 kV transformatora prenosne i distributivne mreže zahvaljujući višegodišnjem praćenju transformatora. Rezultati su prikazani u tabeli 1. Radi poređenja u tabeli 2. prikazani su rezultati statističke analize za transformatore bez regulatora napona. Vidi se da su dozvoljene granice gasa, karakterističnog za rad RN (C_2H_2), relativno visoke (apsolutni iznos koncentracije je mnogo viši nego kod transformatora bez RN).

Tabela 1. Granične vrednosti za 95% pouzdanosti rada 110 kV transformatora u distributivnoj i prenosnoj mreži Srbije

	Koncentracije gasova, ppm				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
Granične vrednosti	114	33	107	116	46

Tabela 2. Granične vrednosti za 95% pouzdanosti rada transformatora bez regulatora napona

	Koncentracije gasova, ppm				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
Granične vrednosti	128	69	7	74	100

U dijagnostici su značajnije individualne granice koncentracija gasova specifične za svaki pojedinačni transformator, tako da je redovno praćenje transformatora ključno u definisanju pogonskog stanja.

3. METODE ISPITIVANJA REGULATORA NAPONA

Stanje regulatora napona direktno se ispituje primenom sledećih metoda:

1. merenje omskih otpora regulacionog namotaja pri različitim pozicijama regulatora
2. merenje razlike temperatura ulja u sudu RN i glavnom sudu transformatora
3. merenje struja napajanja motornog pogona RN
4. ispitivanje karakteristika ulja iz RN (uključujući merenje sadržaja čestica i metala)
5. gasnohromatografska kontrola gasova rastvorenih u ulju RN

Nabrojane metode zasnovane su na praćenju posledica starenja ili deformacije komponenti RN. Pri normalnom radu regulatora, prilikom prebacivanja, dolazi do pojave električnog luka kroz ulje. Tom prilikom se javljaju visoke temperature (preko 1000^oC) što dovodi do intenzivne degradacije (koksovanja) okolnog ulja i produkcije karakterističnih gasova (C_2H_2 i H_2). Nastali karbonizovani depoziti ulja se vremenom talože na kontaktima izazivajući porast prelaznih otpora što dovodi do povećanja rasipanja energije oko kontakata i lokalnog porasta temperature.

Merenjem omskih otpora pri različitim pozicijama regulatora dobija se uvid u stanje svakog pojedinačnog kontakta i uočava se svaka promena otpornosti koja ukazuje na pogoršanje stanja. Ova metoda je zbog velike osetljivosti i preciznosti u lociranju slabih tačaka veoma značajna u redovnom, preventivnom praćenju pogonskog stanja RN.

Merenje razlika temperatura omogućava uočavanje pojave toplih tačaka i povećanih grejanja jer je sud prekidačkog dela RN projektovan tako da temperatura u njemu bude niža nego u glavnom sudu transformatora na istoj visini. Ograničenje temperaturne metode je to što ako pozicija RN u momentu pregleda nije u kritičnom kontaktu, postoji mogućnost da se postojeći problem ne uoči. S druge strane ova metoda omogućava pregled RN dok je transformator u pogonu, što kod metode merenja omskih otpora nije moguće.

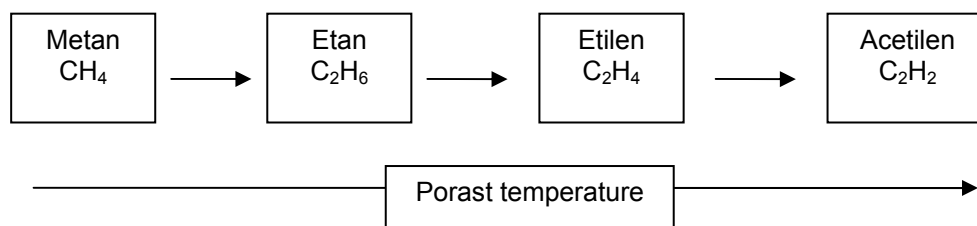
Merenjem faznih struja motornog pogona RN u toku sekvence prebacivanja sa jednog položaja na drugi, mogu se uočiti oštećenja mehanizma RN. Naime, habanje kontakata i mehaničkih delova, oštećenje ili lom opruga ili poluga dovodi do povećanja mehaničkog opterećenja motornog pogona, koje se vidi kroz povećanje faznih struja motora.

Pošto su uslovi rada RN mnogo teži nego u glavnom sudu, prisutno izolaciono ulje je izloženo mnogo bržem starenju. Sadržaj vode, nastalih organskih čestica i rastvorenih metala je mnogo viši u odnosu na ulje transformatora. Nekad se, u cilju poboljšanja stanja ulja RN uvodi kontinualna, on-line filtracija ulja što dovodi do smanjenja troškova održavanja RN. Ispitivanjem fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika može se proceniti kad treba izvršiti zamenu ulja.

4. GASNOHROMATOGRAFSKA ANALIZA ULJA REGULATORA NAPONA

Gasnohromatografska analiza gasova rastvorenih u ulju RN je do skoro bila marginalizovana jer se smatralo da se iz visokih koncentracija gasova koji se stvaraju prilikom normalnog rada RN ne može mnogo zaključiti. Međutim, poslednjih godina postignut je veliki napredak u ovom polju, tako da se danas gasnohromatografska kontrola ulja RN koristi ne samo kao metoda za dijagnostikovanje kvarova na RN već i u određivanju adekvatnog momenta za izvođenje revizije regulatora što je dovelo do velikih ušteda u održavanju transformatora i smanjilo procenat ispada transformatora i kvarova vezanih za RN.

Da bi se bolje razumela dijagnostika na osnovu nastalih gasova, moraju se detaljnije opisati fenomeni vezani za regulator napona i mehanizmi nastajanja gasova. Na dijagramu 2. prikazana je zavisnost nastajanja ugljovodoničnih gasova od temperature reakcije degradacije ulja.



Dijagram 2. Zavisnost nastanka ugljovodonika od porasta temperature (količine energije)

Na visokim temperaturama (preko 1000⁰C) dominirajući gas je acetilen (C₂H₂) uz prateći vodonik (H₂). Ovako visoke temperature su posledica pojave električnog luka kroz ulje pa je pojava ovih gasova vezana za električne pojave. Na nešto nižim temperaturama (oko 700⁰ C), koje su posledica grejanja, dominira etilen (C₂H₄), da bi na još nižim temperaturama bile favorizovale reakcije nastajanja etana (C₂H₆) i metana (CH₄). Zbog toga se ugljovodonični gasovi C₂H₄, C₂H₆ i CH₄ mogu nazvati „termičkim“gasovima, za razliku od C₂H₂ koji je gas pojave luka („električni“ gas).

Na samom mestu pojave luka nastaju C₂H₂ i H₂ kao dominirajući gasovi, dok u okolini, zbog posrednog grejanja, nastaju „termički“gasovi (C₂H₄, C₂H₆ i CH₄) kao prateći. Odnosi „termičkih“ gasova i gasova pojave luka ostaju konstantni tokom vremena, dok se, u zavisnosti od broja operacija povećavaju vrednosti njihovih apsolutnih koncentracija. Izmerene apsolutne koncentracija gasova zavise, pored broja operacija, od tipa regulatora i načina ovazdušenja (zapečaćeni, sa delimičnim ili potpunim disanjem).⁽⁵⁾

Kada tokom vremena dođe do stvaranja značajnih količina depozita na kontaktima (koksovanja) ili erozije, usled čega se kontakti razdešavaju, raste energija rasipanja, a samim tim i temperatura (grejanje). Tada dolazi do porasta u produkciji „termičkih“ gasova, tako da se odnosi „termičkih“ gasova i gasova pojave luka menjaju. Ova promena odnosa gasova je indikacija nepravilnog rada pojedinih kontakata što ukazuje na potrebu revizije ili je uvod u kvar na regulatoru napona.

Glavni odnosi gasova značajni za dijagnostiku stanja regulatora definisani su u Tabeli 2, i podeljeni u dva seta odnosa.⁽³⁾

Tabela 2.Odnosi gasova kvara značajni za dijagnostiku stanja regulatora napona

Odnosi „termičkih gasova“ prema „gasovima luka“ – SET 1			
$R_1 = \frac{C_2H_4}{C_2H_2 + H_2}$	$R_2 = \frac{C_2H_4}{C_2H_2}$	$R_3 = \frac{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_6}{C_2H_2 + H_2}$	$R_4 = \frac{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_6}{C_2H_2}$
Temperaturno zavisni odnosi „termičkih gasova“- SET 2			
$R_5 = \frac{C_2H_6}{CH_4}$		$R_6 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	

Prvi set odnosa gasova prati se u cilju uočavanja pojave grejanja koje nije vezano za pojavu luka, dok drugi set odnosa ukazuje na temperaturni nivo na mestu grejanja.

Glavne prednosti korišćenja odnosa gasova u odnosu na analizu apsolutnih vrednosti koncentracija gasova su:

- nezavisnost od broja operacija regulatora
- nezavisnost od tipa ovazdušenja (gubitak gasova u atmosferu nema uticaja)
- osetljivost na promenu stanja kontakata

Definisanje graničnih vrednosti apsolutnih vrednosti koncentracija i odnosa gasova, nakon kojih se može govoriti o neuobičajenom pogonu regulatora, su ključni problem u dijagnostici. Do sada su ove granične vrednosti određene iz prakse od strane Cinergy i Weidmann, dok su značajni doprinosi po specifičnim tipovima dati od strane Doble⁽¹⁾ i Charles (Bull) Baker. Radna grupa IEEE C57.139 (Dissolved Gas Analysis of Load Tap Changers) načinila je značajne korake u definisanju dijanostike i statističkoj obradi dosadašnjih iskustava. U izradi je vodič za upotrebu gasnohromatografske analize u redovnoj, preventivnoj kontroli regulatora napona.

U tabeli 3. prikazane su granične apsolutne vrednosti ključnih gasova kvara za različite tipove regulatora napona nakon kojih se uvodi pooštreno mesečno praćenje stanja (Cinergy). Učestalo praćenje (mesečno) se preporučuje kod regulatora, kada postoji sumnja u nepravilan rad, zbog velike brzine razvoja kvarova usled ekstremnih radnih uslova.

Tabela 3. Granične vrednosti koncentracija gasova nakon kojih se uvodi mesečno praćenje regulatora

Tip regulatora napona	H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄
sa disanjem (sa ili bez primene desikanata)	> 1500 ppm	> 1000 ppm	> 1000 ppm
zapečaćeni	> 5000 ppm	>9000 ppm	> 1200 ppm
vakuumski	>10 ppm	>5 ppm	> 100 ppm

Opšte granične vrednosti (nezavisne od tipa regulatora) odnosa gasova date su od strane Weidmann i prikazane u Tabeli 4. Dati odnosi se u određenoj meri razlikuju od odnosa koji su dati za pojedinačne tipove regulatora od različitih autora i treba ih posmatrati kao okvirne, pokazne vrednosti, tako da je tendencija da se redovnim praćenjem uspostave specifične granične vrednosti tipične za pojedinačne regulatore ili grupe (slično kao kod određivanja graničnih vrednosti koncentracija gasova rastvorenih u glavnom sudu transformatora). U cilju adekvatnog praćenja neophodno je uraditi GH analizu ulja regulatora odmah nakon revizije čime će biti postavljene početne vrednosti apsolutnih koncentracija i odnosa gasova za dalje praćenje.

Tabela 4. Opšti odnosi gasova za 90% pouzdanosti pojave kvara, dati od strane Weidmann

R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
0.24	0.36	0.38	0.56	0.31	7.51

Primena gasnohromatografske analize ulja regulatora napona dobija svoj pravi značaj definisanjem osnovnih principa specifične dijanostike i sa nove strane osvetljava uvid u pogonsko stanje regulatora čime preuzima ključno mesto u dijagnostici kvarova RN.

5. ZAKLJUČAK

Značaj preventivne kontrole regulatora napona u okviru kontrole transformatora veoma je značajna jer regulator, kao mehanički deo, predstavlja najosetljiviju komponentu. Preventivna kontrola u cilju sprečavanja kvarova i definisanja adekvatnog momenta izvođenja revizije su ključni u redukciji troškova vezanih za regulatore.

Poslednjih godina načinjen je značajan pomak u dijagnostici stanja regulatora gasnom hromatografijom ulja regulatora. Definisanje odnosa gasova i njihovo praćenje ključni su u određivanju pojave grejanja na kontaktima regulatora.

Isto tako, uvodi se novi aspekt prilikom analize sadržaja gasova u ulju glavnog suda transformatora jer se jasnije mogu definisati uticaji gasova iz regulatora, što podiže samu gasnohromatografsku analizu ulja na novi, pouzdaniji nivo.

6. LITERATURA

- (1) Paul J. Griffin, 2005, „Load Tap Changer Diagnostics Using Oil Tests – A Key To Condition – Based Maintenance, 2005 Doble Engineering Company
- (2) A. Bojković, 2001, „Preventivna kontrola i održavanje regulacionih sklopki energetskih transformatora“, Elektroprivreda, br. 3, 2001.
- (3) F. Jakob, „LTC Condition Assessment by Diagnostic Testing“, Weidmann-ACTI
- (4) P. Feghali, „Life Extension Methodology through the Replacement of Old LTCs“, Proceedings of Weidmann-ACTI meeting in 2006.
- (5) D. Rose, „Using Dissolved Gas in Oil Analysis to Determine need for Internal Maintenance of Load Tap Changers“, Third Annual Technical Conference 2004.
- (6) R. Youngblood, „Application of Dissolved Gas Analysis to Load Tap Changeres“, Analytical ChemTech International, Inc. — Sep 23, 2006.

CONDITION BASED ASSESMENT OF TRANSFORMERS WITH ON LOAD TAP CHANGER

S. Teslić¹⁾, Đ. Jovanović¹⁾, B. Bošković¹⁾, V. Radin¹⁾, J. Lukić¹⁾

¹⁾Electrical Engineering Institute „Nikola Tesla“, Koste Glavinica 8a, Belgrade

On load tap changer is crucial element of utility networks and its main task is to maintain constant voltage output from transformer. During its service life it is exposed to increased electrical and mechanical stresses. In this paper OLTC transformers working condition assesment based on dissolved gasses analysis (DGA) was investigated. In order to achieve reliable diagnostics, DGA data base statistical analysis has been done including population of 110 kV transformers with OLTC (data base of Electrical Engineering Institute „Nikola Tesla“). Data base statistical analysis served as a tool to define limit concentration for 95 % normal values. DGA of oil from OLTC is valuable diagnostic tool for evaluation of OLTC working condition and gives oportunity to discover possible faults in early stage and determine need for internal maintenance. Overwiev of other oil analysis that are significant in condition-based maintenance of OLTC is given in correlation with literature findings.

Key words: On load tap changer, diagnostic, dissolved gasses analysis, transformer oil