

## ПРИЛИКА ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ ОДРЖАВАЊА ТРАНСФОРМАТОРА 35/x kV

### OPPORTUNITY FOR IMPROVING THE MAINTENANCE OF 35/x kV TRANSFORMERS

Весна РАДИН, Електротехнички институт Никола Тесла Београд, Србија  
Бранка ЂУРИЋ, Електротехнички институт Никола Тесла Београд, Србија  
Ђорђе ЈОВАНОВИЋ, Електротехнички институт Никола Тесла Београд, Србија  
Владимир ОСТРАЋАНИН, Електродистрибуција Србије д.о.о.  
Радомир ТОДОРОВИЋ, Електродистрибуција Србије д.о.о.

#### КРАТАК САДРЖАЈ

У српској дистрибутивној мрежи највећи удео заузимају трансформатори средњег напонског нивоа који су опремљени бестеретним регулатором напона. Статистичка анализа резултата мерења садржаја гасова растворених у уљу омогућила је увид у учесталост различитих типова квара где се као највише заступљен појављује термички квар са температуром топлог места изнад 700°C (Т3). Из праксе је уочено да се топла места најчешће јављају на бестеретном регулатору напона, што је и потврђено и електричним мерењима и/или дефектажом у фабрици. У овом раду је истражен значај редовног испитивања садржаја гасова растворених у уљу као алата за брзу детекцију квара. Анализирани су случајеви из праксе где је уочен пад количине гасова највероватније као последица разраде контаката на бестеретном регулатору напона током електричних мерења. Управо ова појава је разматрана као прилика за унапређење протокола одржавања трансформатора у циљу смањења броја ове врсте квара.

**Кључне речи:** бестеретни регулатор напона, гасови, грејање, електрични отпор, контакти, трансформаторско уље

#### ABSTRACT

The largest part of the Serbian distributive network is occupied by medium voltage level transformers equipped with de-energized tap changers. The statistical analysis of measurement results of dissolved gas analysis (DGA) results allowed an insight into the frequency of different fault types, where the most common is a thermal fault of temperatures above 700°C (T3). According to experiences from practice, it has been observed that local overheating most often occurs on the de-energized tap changers, which was also confirmed by electrical measurements and/or during factory repair. This study explores the importance of regular DGA as a tool for rapid fault detection. Presented cases showed a decrease in the gasses development rate which occurred as a consequence of several switching operations during resistance measurement.

This very phenomenon was considered as an opportunity for improvement of the transformer maintenance protocol, in order to reduce the occurrence of such faults.

**Key words:** contacts, de-energized tap changer, gas analysis, oil, resistance measurement, tarnish

Весна Радин, vesna.radin@ieent.org, 011/3952077

#### 1. УВОД

Српска електродистрибутивна мрежа се великим делом састоји од трансформатора средњег напонског нивоа (35 kV/x), а њихово одржавање у исправном стању је основни параметар за квалитет испоруке електричне енергије. На дистрибутивним трансформаторима је ретко потребна промена излазног напона па су опремљени бестеретним регулатором напона. Регулатори напона су уређаји чији је главни задатак да повећају или смање излазни напон, а код бестеретних регулатора се та промена подешава само када је трансформатор искључен са мреже и ван погона. Практика је показала да се кварови код трансформатора

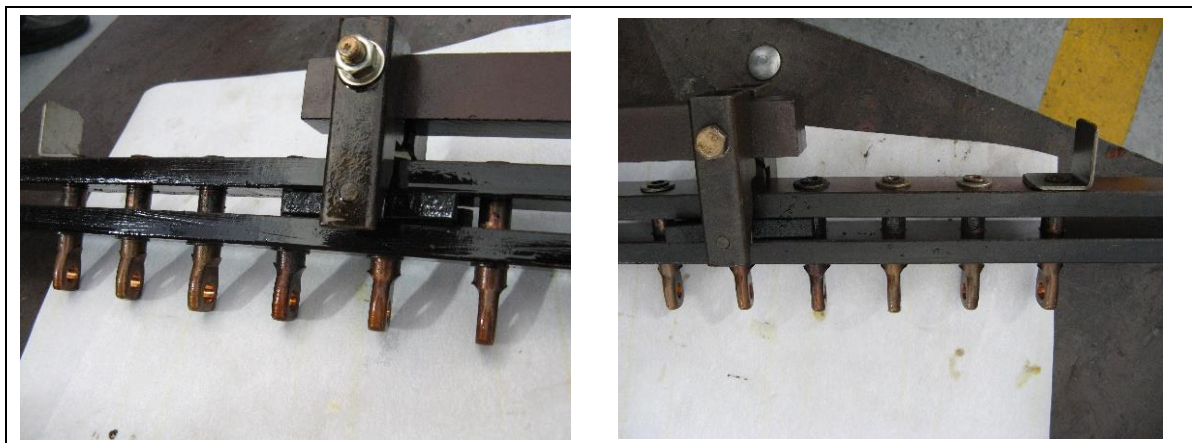
35 kV/x у највећој мери дешавају управо на бестеретном регулатору напона. У овом раду је разматрана ова врста квара и дати су предлози за мере побољшања одржавања са циљем смањења учесталости квара.

## 2. ТЕХНИКА ПРОЦЕНЕ ПОГОНСКОГ СТАЊА И УТВРЂИВАЊА КВАРА

Уобичајена техника за процену погонског стања трансформатора је на основу испитивања садржаја гасова, [1]. Ово испитивање се спроводи на узорку уља узетом из трансформатора који је у погону и управо због тога пружа увид у исправност рада трансформатора. Међутим, трансформатор је исправан онолико колико су исправни његови критични делови, а један од њих је бестеретни регулатор напона. С обзиром да је њихова конструкција таква да немају одвојен суд са уљем, о њиховој исправности на основу садржаја гасова у уљу главног суда се може закључивати само посредно.

Препоручена периодична испитивања садржаја гасова код трансформатора овог напонског нивоа је на две до четири године, што обезбеђује брзо и лако праћење погонског стања трансформатора. Редовно спровођење ове врсте испитивања током година погона омогућило је креирање базе података која пружа својеврсну слику рада сваког појединачног трансформатора. База института Никола Тесла садржи више од 1000 трансформатора напонског нивоа 35 kV/x са близу 4000 мерења садржаја гасова. Статистичка обрада овако великог броја мерења пружа увид у специфичности рада дистрибутивних трансформатора, лако одређивање типичних вредности као и заступљеност најчешће врсте кварова.

Одступање концентрација појединих гасова од типичних вредности као и уочљив тренд пораста јасан је знак да је настала неправилност у раду или квар трансформатора која захтева пажљивију анализу. Једна од највише заступљених врста кварова који се срећу код дистрибутивних трансформатора је термички, односно појава грејања у трансформатору са температуром топлог места изнад 700°C, шифра квара Т3. Статистичка обрада базе података садржаја гасова, показала је да су термички кварови заступљени у преко 70% случајева, [2]. Пракса је показала да се повећано грејање (Т3) код трансформатора средњег напонског нивоа најчешће јавља на контактима бестеретног регулатора напона, што је обично и потврђено електричним мерењима и/или дефектажом у фабрици, слика 1.



Слика 1 - Фотографије контаката бестеретног регулатора напона са дефектаже у фабрици (извор – архива лабораторије Института Никола Тесла, ИНТ)

Идеја и циљ овог рада је разматрање могућности за унапређење одржавања трансформатора како би се минимизовала ова врста квара. Даље у тексту су приказани примери из праксе код којих је дошло до развоја грејања на бестеретном регулатору напона и санација стања без отварања трансформатора.

### 2.1 Пример 1: дистрибутивни трансформатор напонског нивоа 35/10 kV и снаге 8 MVA

Редовна контрола садржаја гасова код овог трансформатора омогућила је уочавање специфичног опсега вредности у којима се крећу поједини гасови. Захваљујући томе, приликом рутинске контроле било је лако уочити пораст неколико гасова, табела 1. Овде се може уочити да су током првих неколико година праћења рада трансформатора угљоводонични гасови били присутни у ниским концентрацијама од свега неколико ppm. Овако ниске концентрације гасова су последица нормалног рада трансформатора под уобичајеним погонским условима и он се сматра исправним (оцена А). Пораст концентрације једног или више гасова указује на промену температурних услова у трансформатору, који су обично последица квара електричне или термичке природе (оцена Ц).

Табела 1 - Развој настајања гасова квара у уљу дистрибутивног трансформатора

Датум	Појединачне концентрације гасова, ppm							Оцена
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљенмоноксид	Угљен-диоксид	
2004	2	1	0	6	1	39	1393	А
2006	1	1	0	5	0	103	1187	А
2010	2	51	1	<b>287</b>	53	84	1370	<b>Ц(ТЗ)</b>

Приликом редовне контроле [3], током 2010. године, уочен је значајан пораст гасова етилена, етана и метана, а апсолутна вредност концентрације етилена од 287 ppm (табела 1) је чак изнад типичних вредности датих у стандарду [1]. Њихова појава у високим концентрацијама и у специфичном односу јесте карактеристика присуства грејања у трансформатору изнад 700°C (шифра ТЗ). Даљи кораци који су уследили након оваквих резултата су спровођење електричних мерења у циљу прецизније локације топлотних места. Уколико се електричним мерењима потврди присуство квара, наредни поступак би био дефектажа и поправка трансформатора у фабрици. Међутим, приликом електричних мерења уочена је још једна појава [4]. Уобичајено је да се мерење електричних отпора намотаја врши пре свега у затеченом положају бестеретног регулатора напона, а затим и у свим осталим положајима, Табела 2.

Табела 2 - Мерење електричних (омских) отпорности намотаја на страни вишег напона 35 kV

Положај склопке	Спој А-В		Спој А-С		Спој В-С		ΔR, %
	I, А	R, mΩ	I, А	R, mΩ	I, А	R, mΩ	
3	10	<b>812,80</b>	10	<b>797,30</b>	10	<b>802,95</b>	<b>1,944</b>
1	10	<b>832,00</b>	10	<b>831,10</b>	10	<b>827,55</b>	<b>0,538</b>
2	10	<b>807,80</b>	10	<b>809,55</b>	10	<b>805,30</b>	<b>0,528</b>
3'	10	<b>785,90</b>	10	<b>786,10</b>	10	<b>782,40</b>	<b>0,473</b>
4	10	<b>766,55</b>	10	<b>767,40</b>	10	<b>763,85</b>	<b>0,465</b>
5	10	<b>747,85</b>	10	<b>748,35</b>	10	<b>744,65</b>	<b>0,497</b>
3''	10	<b>784,10</b>	10	<b>784,70</b>	10	<b>781,30</b>	<b>0,435</b>

Напомена: Са 3, 3' и 3'' означен је редослед мерења

Прво мерење електричних (омских) отпорности, намотаја високог напона у положају 3 бестеретног регулатора напона, показало је увећан отпор за мерни спој А-В у односу на остале мерне спојеве. Максимална разлика отпора између мерних спојева је износила око 2% што је препоручена гранична вредност за исправно погонско стање трансформатора. Приликом мерења електричних отпорности, испитивачи врше промену положаја регулатора кроз цео опсег (од почетног до крајњег). На тај начин, мерење омских отпора је овом приликом спроведено у свим положајима бестеретног мењача, а у средњем (3' и 3'') је још два пута поновљено. Поновљена мерења су показала прилично равномерне и задовољавајуће вредности, са око 0,5% међуфазне разлике. Претпоставка је да је узрок тог додатног отпора површинска патина на средњем положају склопке која је током руковања склопком уклоњена. Треба нагласити се најчешће (у више од 95% случајева) мерења електричних отпора врше само у затеченом положају бестеретног регулатора. Ово је био специјалан случај када се управо сумњало на патину. Последица самог мерења јесте механичка разрада контаката што је довело до растресања, односно спадања наслага. Поновљено мерење електричних (омских) отпорности на овако „разрађеним контактима“ углавном показује ниже вредности отпорности што значи да је стање контаката задовољавајуће. У циљу даљег праћења стања трансформатора, настављено је поштрено праћење садржаја гасова у уљу након годину дана погона, табела 3.

Табела 3 - Садржај гасова у уљу након „разраде контаката“

Датум	Појединачне концентрације гасова, ppm							Оцена
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљенмоноксид	Угљен-диоксид	
2010	2	51	1	287	53	84	1370	<b>Ц(ТЗ)</b>
2011	15	0	0	11	0	110	1591	А
2014	0	1	0	4	0	59	742	А
2018	1	1	0	26	4	55	1003	А

Из табеле 3 се уочава значајан пад концентрације термичких гасова, пре свега етилена након само годину дана погона [5]. Овако ниске концентрације гасова значе да у трансформатору више нема повећаног грајања и сматра се исправним за даљи погон.

## 2.2 Пример 2: дистрибутивни трансформатор напонског нивоа 35/10 kV и снаге 8 MVA

У наредном случају је приказан постепен развој квара, односно праћење пораста концентрација гасова квара кроз године погона. Из табеле 4, може се уочити да је стварање гаса етилена текло постепено кроз године погона. Пораст концентрација угљоводоничних гасова етилена, метана и етана у специфичном односу указује на присуство повећаног грејања са температуром топлог места изнад 700°C (Т3). Динамика испитивања садржаја гасова према стању, омогућила је да се трансформатор правовремено уведе у режим поштреног праћења, током 2018. године [6].

Табела 4 - Праћење настајања гасова квара у уљу

Датум	Појединачне концентрације гасова, ppm						Угљен-диоксид	Оцена
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљенмоноксид		
2004	3	2	1	10	1	38	589	A
2010	3	10	1	102	13	83	810	A
2015	4	13	1	123	19	121	1543	A
2018	6	19	1	131	18	139	1664	A
2019	3	37	2	261	42	119	1420	Б(Т3)
2021a	2427	6063	256	12562	1920	388	1908	Ц(Т3)
2021b	578	4333	219	12396	1991	216	1853	Ц(Т3)
2022	39	296	29	3208	821	128	1648	Ц(Т2)

Тренд пораста термичког гаса етилена је потврђен и 2019. године [7] па су препоручена и електрична мерења у циљу прецизнијег одређивања локације квара. Из табеле 4 се види да је током 2021. године [8] дошло до наглог пораста концентрација свих гасова квара и прораде Бухолц аларма, (ред б). Дошло је до искључења трансформатора и тада су спроведена и електрична мерења [9], а њихови резултати су приказани у табели 5.

Табела 5 - Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпора фаза намотаја 35 kV

Позиција бестеретног регулатора напона	I, A	Спој А-В	Спој В-С	Спој С-А	$\Delta R/R, \%$
		R, m $\Omega$	R, m $\Omega$	R, m $\Omega$	
3	10,0	<b>901,7</b>	809,60	810,6	<b>11,4</b>
	20,0	851,4	792,2	791,9	<b>7,5</b>

Резултати мерења електричног отпора високонапонског (ВН) намотаја приликом првог испитивања имале су увећане вредности отпора у мерном споју А-В у односу на остала два мерна споја, табела 5. Максималне разлике отпора између мерних спојева, мерених у затеченом средњем положају бестеретне регулационе преклопке износиле су 11,4% при испитној струји од 10 А. При испитној струји од 20 А, максималне разлике отпора су износиле 7,5%. Обе вредности међуфазне разлике отпора су вишеструко веће у односу на граничне. Овако велике разлике отпора могу настати услед ослабљених опруга и лоше налегких контаката на овом намотају, што доводи до локалног прегревања и генерисања карактеристичних гасова. У циљу потврде добијених резултата извршено је померање бестеретног регулатора кроз све положаје (од првог до последњег) и понављање мерења на ВН страни у затеченом положају 3, табела 6.

Табела 6 - Измерене апсолутне вредности и максималне релативне разлике отпора између појединих мерних спојева намотаја 35 kV после померања регулатора кроз положаје

Позиција бестеретног регулатора напона	I, A	Спој А-В	Спој В-С	Спој С-А	$\Delta R/R, \%$
		R, m $\Omega$	R, m $\Omega$	R, m $\Omega$	
3	20,0	773,95	761,40	765,35	1,65

Измерене вредности отпора након ове манипулације су биле уједначене, што значи да је међуфазно одступање било у оквиру дозвољених вредности.

Може се закључити да је физичка манипулација бестеретним регулатором напона поново довела до спадања нагомиланих наслага које су биле главни узрок појаве разлике у електричним отпорима и последичног грејања. Поновљена електрична испитивања су показала да је стање контаката на овај начин санирано и да је трансформатор способан за наставак погона. У оквиру поштреног режима праћења након електричних мерења, извршено је и мерење садржаја гасова у уљу. Прва мерења су извишена након две недеље [10], а затим након годину дана погона, табела 6, редови 7 и 8 [11]. Анализа садржаја гасова је показала пад концентрација гасова квара, које су након годину дана погона биле вишеструко ниже.

### 2.3 Сагледавање узрока грејања и мере за његово отклањање

Посматрањем резултата мерења показаних у претходним примерима лако је закључити да не мора сваки „квар“ бити квар. Узрок за повећану продукцију гасова и велике разлике електричних отпорности није увек последица квара опреме. Високе концентрације гасова етилена, метана и етана настају као последица повећаног грејања и то је појава коју би требало детаљније проучити. У том смислу израз „квар“ није адекватна реч али ипак упућује на неправилност у раду трансформатора односно (у овом случају) бестеретног регулатора напона. Ова неправилност се огледа у прекомерном грејању појединих делова опреме.

Претпоставка је да је повећано грејање последица накупљених наслага на контактима. Насlage настају услед нормалног старења самог уља при чему долази до њиховог карбонизовања и таложења на контактима. Талог који настаје на контактима изазива пораст прелазних отпора што доводи до повећања расипања енергије и пораста температуре. Пораст температуре на контактима доводи до стварања термичких гасова на првом месту етилена што се оцењује као потенцијални квар. Физичко руковање (манипулација) регулатором и померање контаката кроз све положаје доводи до спадања наслага чиме се уклања и узорак повећаних отпора и грејања. Овај поступак наводи на закључак да је стање контаката на овај начин могуће и правилно одржавати.

Конструкција бестеретних регулатора напона који су инсталирани на дистрибутивним трансформаторима је таква да се налазе у статичном положају и не подлежу периодичном одржавању. Ретке механичке манипулације бестеретних мењача искључују значајније трошење контаката као што се случај код теретних регулатора. Ипак, у случају потребе пребацивања у други положај, произвођачи препоручују спровођење више операција пребацивања пре постављања у жељени положај. У оперативним упутствима наводи се препорука да је потребно 20 до 25 пута проћи кроз све положаје контаката, [12, 13]. На тај начин се смањује вероватноћа стварања наслага, а већ постојеће се скидају. Такође, за проверу ефикасности овог поступка препоручује се мерење омских отпорности.

Аутори овог рада сматрају да управо у овом поступку лежи прилика за унапређење одржавања дистрибутивних трансформатора средњег напонског нивоа.

Разумљива је и бојазан код корисника да, након више деценија мировања бестеретног регулатора, приликом манипулације може да дође до његовог заглављења и/или механичког оштећења што би захтевало радионички ремонт (поправку). Ово је посебно велики проблем код јединица од којих су неке старије од 40 година и на којима никада до сада није вршена манипулација бестеретног регулатора.

Ипак, да би се одржала функционалност бестеретног регулатора, потребно је да се он повремено помера, макар током редовних годишњих ремонта (уз обавезно контролно мерење електричних отпора пре и након манипулација). У противном, његово постојање представља само потенцијални ризик и временом ће са великом вероватноћом доћи до проблема који су предмет овог рада. Код нових јединица које нису старије од 5 година препорука је да се прихвати пракса одржавања које препоручују произвођачи, [12, 13].

## 3. ЗАКЉУЧАК

У случајевима који су описани у овом раду стање бестеретног регулатора је санирано као последица мерења електричних отпорности које је подразумевало и манипулацију регулатором, што није редовна пракса. Треба имати у виду да се ова врста мерења код дистрибутивних трансформатора средњег напонског нивоа не спроводи периодично, већ само када је уочена неправилност у раду, што некада може бити и прекасно. Адекватна додатна мера одржавања трансформатора била би увођење периодичне манипулације регулатором, што би спречило или у већој мери смањило стварање наслага и појаву грејања. Сама чињеница да је проблем прегревања контаката релативно лако и без отварања трансформатора откљоњен, сматра се добрим начином за унапређење протокола одржавања трансформатора. Последично, то би довело до смањења броја случајева термичког квара трансформатора (ТЗ), који сада сачињавају око 70% свих кварова.

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] IEC 60599 Edition 3.0 2015-09 Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis
- [2] Радин В, Стојановић Н, Ристовић Н, 2012, „Оцена погонског стања дистрибутивних трансформатора средњег напонског нивоа“ CIREC Србија 2012
- [3] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 410167-Л Испитивање изолационих уља из енергетских трансформатора
- [4] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 410321-Л Испитивање трансформатора у дистрибуцији
- [5] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 411468-Л Испитивање изолационих уља из енергетских трансформатора
- [6] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 418530-Л Испитивање изолационих уља из енергетских трансформатора
- [7] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 419400-Л Испитивање изолационих уља из енергетских трансформатора
- [8] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 421466-Л Испитивање изолационих уља из енергетских трансформатора
- [9] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 421467-Л Испитивање трансформатора у дистрибуцији
- [10] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 4121003-Л Испитивање изолационих уља из енергетских трансформатора
- [11] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 423020-Л Испитивање изолационих уља из енергетских трансформатора
- [12] ABB, 17.11.2022, „De-energized tap changer, type DTW“ technical information guide, <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108467A5192&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [13] Maschinenfabrik Reinhausen, 2023 “De-Energized Tap-Changer DEETAP® DU” Operating Instructions, [https://www.reinhausen.com/fileadmin/downloadcenter/products/detc/deetap\\_du/ba/4434105\\_01en.pdf](https://www.reinhausen.com/fileadmin/downloadcenter/products/detc/deetap_du/ba/4434105_01en.pdf)