

Примери испитивања енергетских трансформатора након испада из погона и лоших резултата хемијске анализе узорка уља

Момчило Милић^{1,2} , Ђорђе Јовановић² , Марко Димитријевић^{1,2}

¹ Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, Булевар Краља Александра 73, 11000 Београд, Србија

² Електротехнички институт Никола Тесла, Универзитет у Београду, Косте Главинића 8а, 11000 Београд, Србија

momcilo.milic@ieent.org

Кратак садржај: Енергетски трансформатори представљају једну од најважнијих компоненти у погледу производње, преноса и дистрибуције електричне енергије. Баш зато неопходно је да им се посвети извесна пажња по питању превентивних електричних мерења како би се имао адекватан увид у њихово стање, избегли нежељени кварови и на тај начин обезбедио стабилан и поуздан рад електроенергетског система. Ипак, дешава се да услед разних фактора долази до испада енергетских трансформатора из погона. У таквим случајевима, у зависности од тога која заштита је реаговала и превентивно искључила посматрани трансформатор, а посебно у случају испада по диференцијалној заштити трансформатора, неопходно је пре евентуалног поновног укључења извршити одређена испитивања у циљу процене разлога за испад и даље способности за рад самог трансформатора. Електричним испитивањима би требало да претходи узорковање уља из трансформатора (и/или гаса и уља из Бухолц релеја) ради њихове хемијске анализе методом гасне хроматографије. Резултати хемијске анализе узорка уља могу да искажу сумњу у могуће нерегуларности које могу бити проблем за даљи нормалан погон трансформатора, при чему у таквим ситуацијама следе електрична испитивања чији ће резултати мерења у већини случајева дати бољи увид у стање самог трансформатора. У овом раду ће бити дати примери резултата електричних мерења (најчешће изолациони отпор и фактор диелектричних губитака намотаја, струје магнећења и омски отпор намотаја) извршених након испада енергетских трансформатора из погона и мерења након лоших резултата хемијске анализе узорка уља.

Кључне речи: Енергетски трансформатори – Електрични изолациони систем – Електрична испитивања – Хемијске анализе узорака уља – Диференцијална заштита.

1 Увод

Енергетски трансформатори (ЕТ) сигурно представљају једну од најважнијих компоненти у погледу производње, преноса и дистрибуције електричне енергије. Управо из тог разлога неопходно је да им се посвети извесна пажња по питању превентивних електричних испитивања како би се имао адекватан увид у њихово стање, избегли нежељени кварови и на тај начин обезбедио стабилан и поуздан рад целокупног електроенергетског система. Међутим, неретко се дешава да услед разних погонских фактора долази до испада енергетских трансформатора из погона. У таквим случајевима, у зависности од тога која заштита је реаговала и превентивно искључила посматрани трансформатор, а посебно у случају испада по диференцијалној заштити трансформатора, неопходно је пре евентуалног поновног укључења извршити одређена испитивања у циљу процене разлога за испад и даље способности за рад самог трансформатора. Електричним испитивањима би требало да претходи узорковање уља из трансформатора (и/или гаса и уља из Бухолц релеја) ради њихове хемијске анализе методом гасне хроматографије. Резултати хемијске анализе узорка уља могу да укажу на ризик даљег нормалног погона трансформатора, при чему у таквим ситуацијама следе електрична испитивања чији ће резултати мерења у већини случајева дати бољи увид у стање самог трансформатора. Најчешће су у питању испитивања електричног изолационог система мерењем изолационих отпора и фактора диелектричних губитака и капацитета електричног изолационог система намотаја, затим струја празног хода, омских отпора намотаја, као и по потреби мерења чија је улога да укажу на проблеме везане за геометрију намотаја (индуктивност услед расипања и фреквенцијски одзив намотаја). Кроз неколико примера биће приказани резултати електричних испитивања трансформатора испалих из погона деловањем одређене заштите. Такође, биће дати и коментарисани примери када се поклапају резултати хемијских анализа узорака уља са резултатима извршених електричних мерења, као и случајеви када нису у сагласју.

2 Преглед метода за електрична испитивања енергетских трансформатора

Превентивна мерења обављају се у *off-line* режиму, дакле у безнапонском стању, доведеним испитним напоном, када се према стандардизованим методама и адекватном мерном опремом обављају одређена мерења појединих карактеристичних величина и параметара како електричног изолационог система (ЕИС) тако и активног дела - намотаја и магнетног кола енергетских трансформатора, на основу којих се врши процена - дијагностика тренутног стања и погонске спремности трансформатора. Праћењем трендова карактеристичних величина током периода погона од ранијих до последњег превентивног контролног мерења, као и резултата хемијских испитивања узорака уља, може се проценити преостали животни век трансформатора и на време указати на потребу ремонта и евентуалне санације уочених кварова и неправилности.

У наредних неколико пасуса у кратким цртама су описане методе [1] које се најчешће користе приликом вршења електричних испитивања енергетских трансформатора на терену.

Испитивања отпора изолације [2, 3, 4] - Испитивање се обавља да би се одредила вредност отпора уљно-папирног изолационог система између појединачних намотаја и уземљеног магнетног кола односно конструкције трансформаторског суда и појединачних намотаја међусобно. Вредност отпора изолације заједно са коефицијентом апсорпције, односно индексом поларизације представља меру квалитета изолационог система, односно остарелости и овлажености ЕИС трансформатора. Методом се могу открити електрични кварови у ЕИС намотаја типа пробоја. Када дође до испада трансформатора из погона, углавном се прво врши испитивање изолационог система намотаја трансформатора. Мерење отпора изолације може да укаже на евентуални спој неког од намотаја са масом (уземљењем), односно ослабљеност изолације намотаја како према маси, тако и према другом намотају изазвану кваром на самом трансформатору. У таквим случајевима вредности отпора изолације које се мере су изузетно ниске (изражене у $k\Omega$ или неколико $M\Omega$) што не задовољава потребне критеријуме за назначене напонске нивое [5], а тиме ни даљи наставак погона ЕТ.

Испитивања фактора диелектричних губитака $\tan\delta$ и капацитета [2, 3, 4, 6] – Резултати мерења овом методом користе се у дијагностици стања трансформатора дуги низ година и дају информацију о остарелости и/или овлажености изолационог система и примењују се у случају намотаја и/или пролазних (уводних) изолатора који имају доступан мерни прикључак. Поред тога анализом резултата мерења капацитета може се посредно указати на деформације у геометрији намотаја или неке грубе електричне кварове попут губитка уземљења магнетног кола. Такође,

методом се могу открити електрични кварови у ЕИС намотаја и пролазних изолатора трансформатора, али генерално гледано метода је, као и метода мерења изолационих отпора, поредбена и служи за праћење остарелости и овлажености ЕИС (тренд анализа). Мерење фактора диелектричних губитака и капацитета намотаја и/или пролазних изолатора иде у пакету са мерењем отпора изолације. Ако постоји неки дефект, углавном ће резултовати променом капацитета, док су граничне вредности за $\tan \delta$ за различите напонске нивое дефинисане одговарајућим групама квалитета [5] које јасно дефинишу да ли су вредности $\tan \delta$ задовољавајуће за погон или су неопходне одређене корективне мере зарад побољшања карактеристика ЕИС намотаја.

Испитивања електричних отпора намотаја [2, 3, 4, 7] – Метода која је обавезна при фабричким испитивањима, а поред тога готово неизоставна и у случају редовне превентивне контроле стања трансформатора на месту уградње. Применом ове методе проверава се стање контаката и спојева на намотајима и њиховим међусобним везама у склопу ЕТ. Мерењем омских отпора намотаја проверава се да ли има озбиљнијих оштећења или евентуалних прекида намотаја. Многи трансформатори имају регулатор напона који може бити теретни, односно да врши пребацивање положаја под теретом (ТРП) или бестеретни (БРП) код кога се манипулација врши искључиво у безнапонском стању. Правилан рад и стање контаката се такође проверава мерењем отпора ТРП и БРП. Поред испитивања изолационог система, ова метода је најзначајнија имајући у виду да су електрични кварови ЕТ у највећем броју случајева, поред ослабљености изолационих карактеристика, углавном последица лоших спојева намотаја или лошег стања контаката регулатора напона при чему углавном долази до испада трансформатора услед појаве топлог места које временом кулминира. У таквим случајевима најчешће реагује Бухолц релеј услед појаве гасова, а може се десити да реагује и диференцијална заштита услед појаве несиметрије, и то у екстремним случајевима кад се деси прекид неког од намотаја.

Испитивања струја магнећења и снага губитака празног хода [3, 4] – Метода која се у случају редовних превентивних испитивања на терену обавља при сниженом напону који је ограничен могућностима мобилне опреме за испитивање ЕТ има углавном информативан карактер када су трансформатори у регуларном погону, јер прати тренд вредности струја магнећења и односе измерених вредности по појединим стубовима магнетног кола и говори о стању магнетног кола ЕТ. Међутим у случају испада трансформатора деловањем диференцијалне заштите може да покаже да ли постоји оштећење међузавојне изолације, односно међузавојни спојеви на намотајима. Наиме, када је све у реду добијају се очекиване вредности струја и снага празног хода које имају правилне међусобне односе у зависности од величине, односно снаге трансформатора, док на пример у случају постојања међузавојних спојева на намотајима међусобни односи струја и снага празног хода се

драстично разликују, чак и за неколико редова величине што је скоро сигуран показатељ лошег стања.

Испитивања индуктивности услед расипања - Контрола стања геометрије намотаја код ЕТ представља мерну методу којом се врло једноставно проверава да ли постоји деформација намотаја настала након транспорта, односно померања истог, као и услед деловања погонских напрезања, а посебно дејстава електродинамичких сила при појави блиских кратких спојева у мрежи на коју је испитивани трансформатор прикључен. У случају нарушавања стања геометрије намотаја трансформатора, долази до промене путања расутих флуксева, а мерним методама за мерење индуктивности услед расипања, ови дефекти се могу уочити. Чак и у случају да дође до деформације намотаја, такав трансформатор није аутоматски неспособан за даљи погон, али је услед нарушавања геометрије намотаја трајно ослабљена способност таквог намотаја да поднесе даља напрезања што резултује да би неки следећи „удар“ могао бити кобан по сам трансформатор. Осим тога као последица деформације намотаја може да дође до смањења сигурносног растојања међу завојцима или међу самим намотајима и до повећања напонских напрезања и ризика да дође до прескока или пробоја изолације. У таквим случајевима врши се поштрена динамика испитивања, односно прати се да ли постоји тренд промене, тј. погоршања мерених параметара.

Испитивања фреквенцијског одзива намотаја (*SFRA*) – *SFRA* (*Sweep Frequency Response Analysis*) је метода за анализу фреквенцијског одзива намотаја ЕТ којом може да се процени да ли је дошло до промене геометрије/деформације намотаја и/или померања магнетног језгра трансформатора, без отварања трансформатора. *SFRA* метода је у стању да открије бројне врсте кварова на трансформатору, било механичке или електричне природе [8]. Главна примена ове методе је за откривање механичких кварова, јер се неки од њих могу детектовати само са *SFRA* методом. Електрични кварови се лако могу открити помоћу *SFRA* методе, али се такође могу детектовати и другим методама, тако да се оне често раде у комбинацији са *SFRA* методом, ради веће сигурности када се посумња у квар. Представља комплементарну методу класичној методи мерења индуктивности услед расипања, при чему је разлика што се одзив намотаја мери у широком фреквентном опсегу.

Претходно наведена испитивања се најчешће врше на терену, тј. имају највећу примену, а поред њих постоје и остала мерења попут мерења односа трансформације, мерења парцијалних пражњења, метода диелектричне спектроскопије са проценом садржаја влаге у чврстој изолацији, као и разна неелектрична мерења и друга која се раде у одређеним случајевима. Сва побројана мерења се углавном врше савременим специјализованим уређајима.

3 Примери електричних испитивања енергетских трансформатора услед њиховог испада из погона деловањем одређене заштите или услед лоших резултата хемијских анализа узорака уља из самих трансформатора

Кроз наредних неколико примера биће приказани резултати мерења испитаних енергетских трансформатора на терену, при чему се углавном ради о трансформаторима у електродистрибуцији претежно снаге 4MVA или 8MVA и напонског нивоа 35/10kV. Овакви трансформатори се у већини случајева, због њиховог великог броја у дистрибутивном систему, не испитују редовно, већ углавном у случајевима када дође до њиховог испада из погона или ако се на основу хемијске анализе узорка уља затражи испитивање како би се потврдила сумња на одређени квар. Најчешће додатна електрична испитивања потврде постојање неког квара, али постоје и случајеви када се електричним мерењима не пронађе никаква нерегуларност која би довела у питање сигурност даљег погона трансформатора. То је углавном последица мањих, за примењена електрична мерења „невидљивих“ кварова, који ипак временом могу кулминирати и довести до престанка рада трансформатора. Обим испитивања који се спроводи у оваквим ситуацијама своди се на испитивање изолационог система, мерење струја магнећења и губитака празног хода, као и мерење електричних отпора намотаја. Ако се сумња и на деформације намотаја, врши се мерење једном од метода – индуктивност услед расипања или *SFRA*.

3.1 Пример 1

У овом примеру испитан је трансформатор назначене снаге 12,5 MVA и назначеног напона 35/21(10,5) kV. Прва мерења на поменутом трансформатору извршена су током 2022. године након анализе узорка уља која је указивала на значајан пораст концентрације гаса квара ацетилена карактеристичног за кварове електричне природе [9]. Мерења су вршена у затеченом положају бестеретне регулационе преклопке (БРП).

Табела 1: Мерење изолационих отпора, фактора диел. губитака- $\text{tg}\delta$ и капацитета изолационог система намотаја трансформатора (мерења из 2022. године) [10]

Мерни спој	Изолациони отпори			Фактор диел. губитака и капацитет		
	R_{60° ($M\Omega$)	N (-)	U_{isp} (kV_{dc})	$\text{tg}\delta$ (%)	C (nF)	U_{isp} (kV)
ВН:НН(М)	17070	2,68	5	0,44	6,2354	10
ВН:М(НН)	23900	1,17	5	0,21	1,5956	10
НН:М(ВН)	11590	1,80	5	0,67	5,6389	10

Напомена: ВН – намотај 35kV, НН – намотај 21kV, М – уземљени магнетно коло и трансформаторски суд, $N = R_{60^\circ} / R_{15^\circ}$.

Испитивањем изолационог система (Табела 1) измерене су вредности које указују на задовољавајуће стање за назначене напонске нивое у погледу изолационих карактеристика.

Затим се приступило мерењу струја магнећења и губитака празног хода (Табела 2) чији су резултати мерења били задовољавајући, уз правилне међусобне односе и без назнака оштећења магнетног кола, нити постојања међузавојних спојева на намотајима.

Табела 2 Мерење струја магнећења и губитака празног хода, уз напајање на намотају 35kV (мерења из 2022. године) [10]

Положај БРП:	Спој: 1U-1V1W			Спој: 1V-1U1W			Спој: 1W-1U1V		
	U (V)	I_0 (mA)	P_0 (W)	U (V)	I_0 (mA)	P_0 (W)	U (V)	I_0 (mA)	P_0 (W)
2	230	18,10	2,245	230	12,36	1,552	230	11,94	1,537
	1000	37,86	23,459	1000	26,02	16,103	1000	25,80	16,087
	5000	90,37	315,871	5000	59,14	209,877	5000	58,57	208,665

На крају испитивања извршено је мерење електричних отпора намотаја и том приликом је установљена међуфазна разлика отпора реда 4% (Табела 3), уз увећане вредности отпора намотаја у фази „1U“ као последица лошег споја намотаја 35kV и пролазног изолатора у поменутој фази или контаката БРП. Како у договору са корисником није вршена манипулација БРП, није ни могао бити дефинисан тачан узрок увећаних отпора.

Табела 3 Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпора фаза намотаја 35kV (мерења из 2022. године) [10]

Позиција БРП	Спој: 1U-1V		Спој: 1V-1W		Спој: 1W-1U		$\Delta R/R$ (%)
	I (A)	R (m Ω)	I (A)	R (m Ω)	I (A)	R (m Ω)	
2	10,0	481,0	10,0	469,7	10,0	489,2	4,15

Кориснику је након извршених испитивања наговештено да даљи погон наведеног трансформатора носи са собом извесни ризик, при чему је препоручено да се врши поштена гаснохроматографска (ГХ) анализа узорка уља, као и да се у што краћем року изврши преглед и санација лоших спојева. Одлука корисника била је да трансформатор буде пуштен у погон узимајући у обзир наведене препоруке.

Након нешто више од годину дана погона дошло је до испада трансформатора из погона деловањем диференцијалне заштите. Затражена су хитна електрична испитивања. Измерени изолациони отпори нису указивали на слабљење изолационих карактеристика намотаја (Табела 4).

Табела 4 Мерење изолационих отпора изолационог система намотаја трансформатора (мерење из 2023. године) [11]

Мерни спој	Изолациони отпори		
	R _{60°} (M Ω)	N (-)	U _{isp} (kV _{dc})
ВН:НН(М)	9530	2,23	5
ВН:М(НН)	12100	1,25	5
НН:М(ВН)	6680	1,62	5

Међутим, мерењем струја магнећења и губитака празног хода добијене су вредности (Табела 5) које су указивале на оштећење намотаја, односно постојање међузавојних спојева на намотајима.

Табела 5 Мерење струја магнећења и губитака празног, уз напајање на намотају 35kV (мерење из 2023. године) [11]

Положај БРП:	Спој: 1U-1V1W			Спој: 1V-1U1W			Спој: 1W-1U1V		
	U (V)	I ₀ (mA)	P ₀ (W)	U (V)	I ₀ (mA)	P ₀ (W)	U (V)	I ₀ (mA)	P ₀ (W)
3	230,1	1618,0	117,70	230	1613,0	117,50	230	12,33	1,549 0

Упоредивањем вредности из табела 2 и 5, јасно се виде огромне међуфазне разлике струја и снага празног хода без обзира на то што БРП није била у истом положају у оба случаја. Да је нормално стање, струје и снаге празног хода би се разликовале незнатно у зависности од положаја БРП.

Такође, резултати мерења електричних отпора намотаја 35kV (Табела 6) су показали екстремно увећане отпоре, уз сумњу на потенцијални прекид намотаја у фази „1U“, узимајући у обзир да је међуфазна разлика отпора износила 100%. Већ на основу мерења из 2022. године се наслућивало на проблем у поменутој фази, а евидентно погоршање је потврђено након нешто више од годину дана погона што се јасно види поређењем табела 3 и 6. И у овом случају треба рећи да БРП није била у истом положају, али те разлике зависне од позиције БРП су незнатне када је стање трансформатора нормално.

Табела 6 Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпора фаза намотаја 35kV (мерење из 2023. године) [11]

Положај БРП:	Спој: 1U-1V		Спој: 1V-1W		Спој: 1W-1U		$\Delta R/R$ (%)
	I (A)	R (mΩ)	I (A)	R (mΩ)	I (A)	R (mΩ)	
3	10,0	1161,50	10,0	581,80	10,0	580,75	100,00

Како трансформатор није био способан за погон, одлучено је да се исти транспортује у фабрику на поправку где је установљен прекид намотаја у фази „1U“.

3.2 Пример 2

У овом примеру приказани су резултати мерења након испада трансформатора 35/10kV, 8MVA из погона деловањем Бухолц релеја. У оваквим ситуацијама углавном се сумња на потенцијални термички квар унутар трансформатора када услед локалног прегревања долази до стварања гасова који се издвајају и нагомилавају у Бухолц релеју изазивајући његову реакцију (опомену или испад). На захтев корисника најпре се приступило електричним испитивањима у претходно поменутом обиму.

Испитивање изолационог система показало је сасвим задовољавајуће параметре у свим мерним спојевима, при чему су измерене вредности отпора изолације и фактора диелектричних губитака квалификовале ЕИС намотаја трансформатора у 1. групу квалитета за назначене напонске нивое [5].

Струје и снаге празног хода измерене при пар различитих испитних напона имале су очекиване и правилне међуфазне односе и указивале

су да нема грубих оштећења (промена) на магнетном колу трансформатора, односно да нема сумње на постојање међузавојних спојева на намотајима.

На крају су извршена мерења електричних отпора намотаја 35kV у затеченом положају БРП и 10kV чији су резултати дати у табелама 7 и 8.

Табела 7 Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпора фаза намотаја 35kV[12]

Позиција ТРП	Спој: A-B		Спој: B-C		Спој: C-A		$\Delta R/R$ (%)
	I (A)	R (m Ω)	I (A)	R (m Ω)	I (A)	R (m Ω)	
3	10,0	757,40	10,0	757,0	10,0	756,45	0,13

Табела 8 Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпора фаза намотаја 10,5kV[12]

Спој: a-n		Спој: b-n		Спој: c-n		$\Delta R/R$ (%)
I (A)	R (m Ω)	I (A)	R (m Ω)	I (A)	R (m Ω)	
10,0	30,530	10,0	39,918	10,0	30,656	30,75
40,0	30,422	40,0	39,646	40,0	30,540	30,32

На основу резултата мерења датих у табелама 7 и 8 дошло се до закључка да највероватније постоји лош спој извода намотаја и пролазног изолатора у фази „b“ на страни 10,5kV. Тај лош спој практично представља топло место и онемогућује нормалан и неометан рад трансформатора. Препоручена је санација лошег споја, а трансформатор у оваквом стању је окарактерисан као неспособан за даљи погон.

Одмах по завршетку електричних испитивања узет је узорак уља за ГХ анализу чији прелиминарни резултати су потврдили сумњу на квар електричне природе.

3.3 Пример 3

Овај пример показује да резултати хемијских анализа узорка уља и електричних мерења не морају увек бити усаглашени, односно не дају увек исте закључке. У табели 9 приказани су резултати ГХ анализе

узорка уља за трансформатор 35/10kV, 4MVA и то за два узорка уља узета у размаку краћем од месец дана чији су се резултати разликовали у значајној мери.

Табела 9 Резултати гаснохроматографске анализе уља према SRPS EN 60567, узоркованог: 3/8/2023, 4/9/2023[13]

Датум узорковања		3.8.2023.	4.9.2023.
Ниво		Средњи	Средњи
Појединачне концентрације гасова, ppm	Водоник (H ₂)	5	721
	Метан (CH ₄)	2	346
	Ацетилен (C ₂ H ₂)	0	831
	Етилен (C ₂ H ₄)	24	956
	Етан (C ₂ H ₆)	1	120
	Угљен моноксид (CO)	172	821
	Угљен диоксид (CO ₂)	1463	2660
	Кисеоник (O ₂)	21168	20812
	Азот (N ₂)	54929	55258
Оцена		A	C (D2)

Анализа узорка уља од 4.9.2023. каже следеће: У узорку уља, узоркованом наведеног датума, измерене су високе концентрације садржаја гасова квара: водоника, метана, ацетилена, етилена, етана, оцена C. Међусобни односи гасова указују на присуство електричних пражњења велике густине енергије, шифра D2 према интерпретацији односа гасова применом Дуваловог троугла и пентагона.

Након тога извршена су електрична мерења. Резултати испитивања електричног изолационог система намотаја трансформатора, струје магнећења и губици празног хода, као и измерене вредности електричних отпора намотаја били су сасвим задовољавајући [14]. У наставку нису дати табеларно, али су све измерене вредности указивале на регуларно стање трансформатора који је према електричним испитивањима окарактерисан као способан за даљи нормалан погон.

У оваквим ситуацијама могуће је да је услед неког погонског догађаја дошло до краткотрајног пренапона унутар трансформатора који је резултовао прескоком, али не и пробојем изолације, праћеним електричним луком који је узроковао генерисање гасова електричног пражњења велике густине струје. Могуће је и присуство парцијалних пражњења (ПП), али је за њих карактеристичан други састав гасова

дефекта, доминантно водоник и метан. Овакви пролазни „кварови“ односно присуство ПП не могу да се „ухвате“ извршеним мерењима. Међутим, према последњим информацијама трансформатор је пуштен у погон и ради нормално, при чему је препорука да се врши праћење стања ГХ анализом узорка уља како би се видело да ли долази до погоршања карактеристика наведених у табели 9.

3.4 Пример 4

У овом примеру реч је о трансформатору 35/10kV, 4MVA који је исплао из погона услед погонског догађаја изазваног снажним невременом. Деловао је Бухолц релеј. По доласку на место уградње трансформатора визуелним прегледом уочена су оштећења пролазних изолатора на страни 35kV услед деловања пренапонског таласа (слике 1 и 2).



Слика 1: ВН пролазни изолатор у фази „В“ трансформатора Т-1



Слика 2: ВН пролазни изолатор у фази „А“ трансформатора Т-1

Резултати испитивања ЕИС намотаја трансформатора, струје магнећења и губици празног хода, као и измерене вредности електричних отпора намотаја указали су на задовољавајуће стање [15]. У наставку су дати табеларно само резултати испитивања изолационог система (Табела 10) на основу којих се могло доћи до закључка да су измерене вредности фактора диелектричних губитака - $\text{tg}\delta$ мало више, али још увек у оквиру препоручених граничних критеријума за назначене напонске нивое [5].

Табела 10 Мерење изолационих отпора, фактора диел. губитака- $\text{tg}\delta$ и капацитета изолационог система намотаја трансформатора[15]

Мерни спој	Изолациони отпори			Фактор диел. губитака и капацитет		
	R_{60° ($M\Omega$)	N (-)	U_{isp} (kV_{dc})	$\text{tg}\delta$ (%)	C (nF)	U_{isp} (kV)
ВН:НН	1930	1,11	5	0,66	3,7887	10
ВН:М	4510	1,11	5	0,61	1,5879	10
НН:М	2440	1,13	5	0,77	3,5578	10

Нешто више вредности $\text{tg}\delta$, као и нешто ниже вредности коефицијената апсорпције N у свим мерним спојевима последица су деловања пренапонског таласа који је највероватније краткотрајно изазвао одређене промене унутар изолационог система што је имало

утицаја на ове вредности. Имајући у виду резултате извршених електричних и хемијских испитивања [16] (Табела 11) разлог за испад трансформатора из погона и појаву гаса у Бухолц релеју може бити услед прелазне појаве - прескока по површини ВН пролазних изолатора и истовременог пробоја кроз уље између контаката бестеретне регулационе преклопке, позиционираних у горњој зони суда трансформатора (изнад активног дела), или пробоја према уземљеним деловима трансформатора, услед деловања атмосферског пренапонског таласа.

Табела 11 Резултати гаснохроматографске анализе уља према SRPS EN 60567, узоркованог 8/7/2022 [16]

Датум узорковања		8.7.2022.
Ниво		Доњи
Појединачне концентрације гасова, ppm	Водоник (H ₂)	702
	Метан (CH ₄)	98
	Ацетилен (C ₂ H ₂)	640
	Етилен (C ₂ H ₄)	150
	Етан (C ₂ H ₆)	6
	Угљен моноксид (CO)	68
	Угљен диоксид (CO ₂)	740
	Кисеоник (O ₂)	24334
	Азот (N ₂)	52082
Оцена		C (D2)

Препоручено је пуштање трансформатора у празан ход у трајању од једног дана, а затим и његово терећење уколико се током празног хода не уоче нерегуларности у раду као и да се изврши ГХ анализа узорка уља након месец дана погона.

Такође, препоручено је да се изврши провера растојања и подешење рогова варничара на пролазним изолаторима на ВН страни, као и замена оштећених пролазних изолатора у догледно време.

4 Закључак

Идеја рада је да се кроз практичне примере прикажу резултати мерења и искуства са теренских испитивања у случајевима када је дошло до испада трансформатора из погона и/или услед лоших резултата хемијских анализа узорака уља. У већини случајева престанак рада трансформатора након деловања одређене заштите последица је неког квара унутар трансформатора који се манифестује и кроз саме резултате електричних испитивања, где се јасно види шта је довело до испада трансформатора из погона. Резултати хемијских анализа узорака уља углавном су у сагласности са резултатима електричних испитивања на трансформатору, али исто тако се може десити да се електричним испитивањима не потврди сумња заснована на хемијској анализи узорака уља. Процена погонске способности, односно спремности трансформатора на основу анализа резултата електричних и хемијских испитивања може бити веома једноставна када постоји узајамно потврђивање сумње на одређени квар, али исто тако добија на сложености у погледу доношења правих закључака када то није случај.

Захвалница са бројем уговора

Овај рад је подржало Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије кроз Уговор о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2023. години (број уговора 451-03-47/2023-01/200038).

Литература

- [1] Студија: Савремене методе и уређаји за испитивање, мониторинг и дијагностику стања енергетских и мерних трансформатора, група сарадника Електротехничког института „Никола Тесла“, Београд, Електропривреда Србије, 2010
- [2] *Енергетски трансформатори. део 1: Опште*, SRPS EN 60076-1:2012
- [3] *IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus-Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors* IEEE Std 57.152:2013.

- [4] -Объем и нормы испытаний электрооборудования РАО энергетики и электрификации "ЕЭС России" РД 34.45-51.300.97.— 6-е изд. М.: ЭНАС, 2001.
- [5] Нацрт ИНТЕРНИ СТАНДАРД ЕПС ИС 09-2 Испитивања и контроле енергетских трансформатора у погону, Прво издање, април 2014 (у поступку усвајања)
- [6] *Мерни мостови - Примери типичних мостова*, SRPS N.A5.016:1972-
- [7] *Енергетски трансформатори - Део 2: Пораст температуре код трансформатора уроњених у течност*. SRPS EN 60076-2:2011 -
- [8] "Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)", Техничка препорука-брошура CIGRÉ REF. 342 SC A2, WG A2.26, No 342 - April 2008. <https://www.e-cigre.org/publications/detail/342-mechanical-condition-assessment-of-transformer-windings-using-frequency-response-analysis-fra.html>
- [9] Извештај Института Никола Тесла бр. 422439-Л
- [10] Извештај Института Никола Тесла бр. 422092-Л
- [11] Извештај Института Никола Тесла бр. 423346-Л
- [12] Извештај Института Никола Тесла бр. 423476-Л
- [13] Извештај Института Никола Тесла бр. 423334-Л
- [14] Извештај Института Никола Тесла бр. 423479-Л
- [15] Извештај Института Никола Тесла бр. 422230-Л
- [16] Извештај Института Никола Тесла бр. 422312-Л

Abstract: Power transformers represent one of the most important components in terms of generation, transmission and distribution of electrical power. Precisely for this reason, it is necessary to pay some attention in terms of preventive electrical measurements that should be done in order to have an adequate insight into their condition, avoid unwanted breakdowns and thus ensure stable and reliable operation of the entire power system. However, there are situations when power transformers fail due to various factors. In such cases, depending on which protection has reacted and preemptively switched off the observed transformer, and especially in the case of an outage due to the differential protection of the transformer, it is necessary to carry out certain tests before possible reconnection in order to assess the reason for the outage and the continued ability of the transformer itself to work. Electrical tests should be preceded by sampling oil from the transformer (and/or gas and oil from the Buchholz relay) for chemical analysis by the gas chromatography method. The results of the chemical analysis of the oil sample can express doubts about possible irregularities that may be a problem for further normal operation of the transformer and such situations are followed by certain electrical tests whose results in most cases will give a better insight into the state of the transformer itself.

This paper will give examples of the results of electrical measurements (most often insulation resistance and dielectric loss factor of windings, magnetizing currents and ohmic resistance of windings) made after power transformers were out of operation and measurements after bad results of chemical analysis of oil samples.

Keywords: Power transformers - Electrical insulating system - Electrical measurements – Chemical analyzes of oil samples – Differential relay protection.

Examples of Power Transformers Testing after Outages and Bad Results of the Chemical Analysis of the Oil Sample

Momčilo Milić, Đorđe Jovanović, Marko Dimitrijević

Rad primljen u uredništvo: 28.11.2023. godine.

Rad prihvaćen: 21.12.2023. godine.

