

Момчило Ј. Милић¹, Марко Д. Димитријевић¹,
Ђорђе Е. Јовановић¹, Владимир Остраћанин²



Детекција кварова и погоршања стања енергетских трансформатора профилактичким електричним испитивањима на терену – примери и искуства из праксе

¹ Универзитет у Београду – Електротехнички институт „Никола Тесла” АД, Београд, Србија*

² Електродистрибуција Србије д.о.о. Београд

<https://doi.org/10.18485/epij.2024.2.2.1>

Стручни рад

Кључне поруке

- Значај поузданог рада енергетских трансформатора зарад стабилности функционисања целокупног електроенергетског система
- Важност профилактичких електричних испитивања енергетских трансформатора у погледу њиховог очувања и продужетка њиховог животног века
- Превентивна испитивања, уз адекватан мониторинг и дијагностику, енергетских трансформатора као алат за спречавање потенцијалних кварова адекватним реаговањем

Кратак садржај

Енергетски трансформатори представљају једну од најважнијих компоненти у ланцу од производње до расподеле електричне енергије, па се без обезбеђивања њиховог нормалног рада не може имати ни стабилно ни поуздано функционисање целокупног електроенергетског система. Управо из тог разлога неопходно је да им се посвети адекватна пажња по питању превентивних (тзв. профилактичких) електричних испитивања како би се имао бољи увид у њихово стање, избегли и предупредили нежељени кварови, а самим тим обезбедило неометано напајање и задовољиле потребе конзума за електричном енергијом. Ипак, дешава се да услед деловања разних фактора долази до испада енергетских трансформатора из погона. Стога постоји велика потреба за електричним испитивањима, како превентивно тако и касније, након испада трансформатора из погона, која ће нам пружити сигурност при доношењу одлука у вези са даљим поступањима са овим важним елементом електроенергетског система. Електрична мерења која се врше на енергетским трансформаторима, у склопу мониторинга и дијагностике саме високонапонске опреме, носе информације и тиме дају слику њиховог општег стања. Увидом у стање појединих целина трансформатора, као што су електрични изолациони систем намотаја и пролазних изолатора, теретна или бестеретна регулациона преклопка, магнетно коло, сами намотаји итд. добијамо значајне информације које нам могу помоћи да правовремено реагујемо и избегнемо кварове или потенцијалне застоје у производњи и преносу електричне енергије. У овом раду ће бити приказани примери резултата електричних испитивања којима су детектовани кварови, као и погоршања стања одређених параметара. У питању су редовна и ванредна превентивна дијагностичка испитивања енергетских трансформатора, применом савремених метода. Рад ставља акценат на значај и потребу за електричним испитивањима високонапонске опреме у циљу безбедног и поузданог рада читавог електроенергетског система.

Кључне речи

Електрична испитивања, електрични изолациони систем, енергетски трансформатори

Примљено: 3. септембар 2024. Рецензирано: 3. октобар 2024.
Измењено: 7. октобар 2024. Одобрено: 11. октобар 2024.

* Кореспондирајући аутор: Момчило Ј. Милић, тел.: 0648243869
Имејл: milicmomcilo92@gmail.com

Напомена:

Чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Примери проналажења кварова и погоршања одређених параметара на енергетским трансформаторима у склопу превентивних електричних испитивања на терену“, награђеног у Студијском комитету СТК-А2 Трансформатори, на 36. Саветовању CIGRE Србија, 22-26. маја 2023.

1. УВОД

Енергетски трансформатори (ЕТ) представљају један од најважнијих елемената производног, преносног и дистрибутивног система. Из тог разлога заузимају посебно место у стратегији очувања поузданости и стабилности електроенергетског система. Имајући у виду да је у данашње време практично немогуће замислити живот без електричне енергије, односно да су нормалан рад и функционисање човека као јединке, затим читавог система, државе готово неизводљиви, онда потреба за електричном енергијом постаје приоритет. Како би се обезбедио правилан и поуздан рад енергетских постројења, а самим тим и задовољиле потребе конзума, неопходно је посебну пажњу посветити одржавању кључних елемената електроенергетског система у које неминовно спадају и ЕТ. Сврха превентивне контроле ЕТ је правовремено спречавање хаварије на њима периодичним контролним испитивањима и мерењима појединих карактеристичних величина електричног изолационог система (ЕИС), намотаја и магнетног кола како би се добио увид у тренутно стање ЕТ, а затим на основу тога предузеле адекватне акције или корективне радње да би се предупредили нежељени кварови или потенцијални застоји у производњи и преносу електричне енергије и такође донеле важне пословне одлуке о потреби замене елемента. Међутим, неретко се дешава да услед разних погонских фактора долази до испада ЕТ из погона. У таквим случајевима, у зависности од тога која заштита је реаговала и превентивно искључила посматрани ЕТ, а посебно у случају испада који је проузрокован деловањем диференцијалне заштите ЕТ, неопходно је пре евентуалног поновног укључења извршити одређена испитивања у циљу процене разлога за испад и даље способности за рад самог ЕТ. Метода превентивне контроле ЕТ подразумева мултидисциплинарни приступ – у дијагностици се најчешће спроводе хемијска испитивања узорака уља која обухватају испитивање физичко-хемијских и електричних карактеристика (ФХЕ) уља, заједно са мерењем садржаја воде у уљу и одређивање садржаја гасова растворених у уљу методом гасне хроматографије (ГХ), али и опсежна електрична испитивања у безнапонском стању која обухватају све савремене испитне методе које се примењују у пракси профилактичких испитивања ЕТ у свету, [1]. У наставку наведене мерне методе прате понашање ЕТ и промене параметара под утицајем погонских напрезања на бази којих се процењује стање активног дела ЕТ – преваходно намотаја и магнетског кола, али и ЕИС-а. Идеја је да се кроз рад да осврт на методе које се користе, али укратко јер је пре свега главни акценат да се у раду прикажу примери и искуства у вези са кваровима потврђеним електричним мерењима уз напомену да су превентивна мерења важна алатка која може помоћи да до кварова у већем броју случајева не дође, као и да се правовремено отклоне потенцијалне аномалије и проблеми.

2. САВРЕМЕНЕ МЕТОДЕ У ОКВИРУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ИСПИТИВАЊА ЕНЕРГЕТСКИХ ТРАНСФОРМАТОРА

Превентивна мерења обављају се у *off-line* режиму, дакле у безнапонском стању, када се према стандардизованим методама и мерном опремом обављају разноврсна мерења појединих карактеристичних величина и параметара како ЕИС-а тако и активног дела – намотаја и магнетног кола ЕТ, на основу којих се врши процена – дијагностика тренутног стања и погонске спремности ЕТ. Праћењем трендова карактеристичних величина током времена погона од ранијих до последњег превентивног контролног мерења може се проценити преостали животни век ЕТ и на време указати на потребу ремонта и евентуалне санације уочених кварова и неправилности.

У наставку текста биће у кратким цртама дат преглед мерних метода у склопу профилактичких електричних испитивања на терену.

2.1 Мерење отпорности изолације и индекса поларизације

Мерење отпорности изолације уз одређивање индекса поларизације је једна од старијих, ако не и најстарија метода у дијагностици стања ЕИС намотаја и пролазних изолатора ЕТ. Испитивање се обавља да би се одредила вредност отпорности изолације између појединачних намотаја и масе и појединачних намотаја међусобно. Резултати мерења отпорности изолације се добијају или директно у мегаомима ($M\Omega$) или се могу посредно израчунати из мерења примењеног напона и измерене струје цурења кроз ЕИС. Вредност отпорности изолације заједно са индексом поларизације представља меру квалитета изолације, односно остарелости и овлажености ЕИС ЕТ. Користи се у фабричким испитивањима ЕТ, као и приликом редовних и ванредних испитивања ЕТ на терену.

Методом се могу открити електрични кварови у ЕИС намотаја и пролазних изолатора, али у суштини метода је поредбена (тренд анализа) и служи за праћење остарелости и овлажености ЕИС-а у циљу доношења правовремене одлуке о ревитализацији ЕИС ЕТ.

Отпорност изолације се дефинише као отпорност (у $M\Omega$) коју пружа изолација приликом излагања једносмерном напону. Мерење отпорности изолације и индекса поларизације у основи је UI метода где се мерење врши мегаомметром, уређајем стабилног једносмерног напона одређене вредности.

2.2 Мерење фактора диелектричних губитака $\tan\delta$ и капацитивности

Мерење фактора диелектричних губитака $\tan\delta$ и капацитивности намотаја ЕИС-а и/или пролазних изолатора јесте једна од основних метода у

дијагностици стања ЕТ и као таква у употреби је дуги низ година у оквиру фабричких и превентивних испитивања ЕТ.

Резултати који се добијају мерењем $\tan\delta$ и капацитивности у одређеним мерним спојевима представљају меру остарелости и/или овлажености изолационог система. Осим тога мерење капацитивности може посредно да указује на деформације у геометрији намотаја и неке грубе електричне кварове попут неуземљеног магнетног кола.

Методом се могу открити електрични кварови у ЕИС-у намотаја и пролазних изолатора ЕТ, али у суштини метода је, као и метода мерења изолационе отпорности, поредбена и служи за праћење остарелости и овлажености ЕИС-а (тренд анализа).

Мерење фактора диелектричних губитака $\tan\delta$ и капацитивности у данашње време врши се специјализованим аутоматизованим уређајима за дијагностику изолације, који раде на принципу прецизних ватметара који могу да мере снаге уз мали $\cos\phi$ и који мере укупну, активну и реактивну струју кроз изолациони систем и на основу тога израчунавају параметре изолације – капацитет и фактор диелектричних губитака, $\tan\delta$. Мерење се обавља при високом наизменичном напону одређене вредности диктиране могућностима уређаја за мерење.

2.3 Мерење електричне отпорности

Метода мерења електричне отпорности је, уз мерење отпорности изолације, једна од најстаријих метода која се користи за испитивање ЕТ. Она је обавезна при фабричким испитивањима са којим започиње, али се примењује и код редовне превентивне контроле стања ЕТ на месту уградње.

Применом ове методе проверава се стање контаката и спојева на намотајима и њиховим међусобним везама у склопу ЕТ. Мерењем омских отпорности намотаја проверава се да ли има озбиљнијих оштећења или евентуалних прекида намотаја. Многи ЕТ имају регулатор напона (регулациону преклопку, РП) који може бити теретни, односно да врши пребацивање положаја под теретом (ТПП) или бестеретни (БПП) код кога се манипулација врши искључиво у безнапонском стању. Правилан рад и стање контаката се такође проверава мерењем отпорности TPP и BPP.

Суштина ове методе је пропуштање стабилне једносмерне струје кроз намотаје ЕТ и мерење пада напона на крајевима намотаја што се постиже савременим модернизованим мерним уређајима.

2.4 Мерење струја и снага празног хода

Мерење струја и снага празног хода, у фабрици, при пријемним испитивањима спада у групу рутинских испитивања. Оглед празног хода има за циљ да потврди унапред договорене губитке у магнетном колу ЕТ. Ова метода налази примену и у теренским, профилактичким испитивањима, у циљу провере стања магнетног кола или намотаја преко кога се врши магнетисање. На терену, мерење струја и снага празног

хода врши се обично сниженим напоном, при монофазном напајању или трофазном, због ограничених могућности извора напајања.

Оглед празног хода изводи се довођењем напона на један систем намотаја, а остали намотаји се остављају отворени. Током огледа мере се напон напајања, струја и снага узета из мреже.

2.5 Мерење индуктивности услед расипања

Контрола стања геометрије намотаја код ЕТ представља мерну методу којом се, без потребе за скупим и релативно ризичним поступком отварања и вађења ЕТ из суда и визуелне контроле стања намотаја, проверава стање деформације намотаја након транспорта, односно померања истог, као и последица дејстава електродинимичких сила при појави кратких спојева у мрежи на коју је испитивани ЕТ прикључен. У случају нарушавања стања геометрије ЕТ, долази до промене путања расутих флуксева намотаја, а одређеним мерним методама за мерење индуктивности услед расипања ови дефекти се могу уочити.

2.6 Фреквенцијски одзив трансформатора (SFRA)

SFRA (*Sweep Frequency Response Analysis*) јесте метода за анализу фреквенцијског одзива ЕТ којом може да се процени да ли је дошло до деформација и/или померања језгра и намотаја ЕТ, без отварања ЕТ. SFRA метода је у стању да открије бројне врсте кварова на ЕТ, било механичке или електричне. 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 неке методе често раде у комбинацији са SFRA методом, ради веће сигурности када се посумња у квар.

ЕТ може да се посматра као комплексна електрична мрежа расподељених RLC елемената, састављена од отпорности бакра R, индуктивности намотаја L, капацитета C између суседних навојака, сваког намотаја према другом намотају, као и капацитета навојака и намотаја према маси, коју представљају језгро и суд ЕТ. Ипак, поједностављено еквивалентно коло са скупом RLC компоненти може да се користи да се објасни принцип фреквенцијског одзива. RLC елементи ЕТ формирају бројна редна и паралелна резонантна кола која су зависна од фреквенције и која у суштини одређују јединствени фреквенцијски одзив ЕТ.

Било који облик физичког оштећења ЕТ доводи до промене његове RLC мреже. Промене могу да се детектују методом фреквенцијског одзива. Мерење фреквенцијског одзива се врши пропуштањем простопериодичног сигнала променљиве фреквенције кроз намотаје ЕТ и мерењем улазних и излазних сигнала. Однос ова два сигнала (излаз/улаз) даје потребан одзив ЕТ. Овај однос се назива функција преноса ЕТ која је зависна од фреквенције. Функција преноса на свакој фреквенцији је мера импедансе RLC мреже ЕТ. Геометријске деформације унутар ЕТ

мењају RLC мрежу, мења се функција преноса и долази до промене фреквенцијског одзива (промена резонантних фреквенција), што указује на могућност постојања квара, [2].

Генерално, претходно наведена испитивања се најчешће врше на терену и имају највећу примену, а поред њих постоје и остала мерења, попут мерења парцијалних пражњења, процене садржаја влаге у чврстој изолацији, као и разна неелектрична и друга мерења која се спроводе у одређеним случајевима.

Такође, треба рећи да се у данашње време углавном сва наведена испитивања врше у склопу фабричких испитивања и као таква представљају тзв. нулта, референтна мерења са којима ће се вршити поређења свих наредних електричних мерења. То је од великог значаја за праћење тренда стања ЕТ и доношење закључака и адекватних акција.

Важно је напоменути да разни фактори утичу на поједина мерења. На пример, температура ЕТ и амбијентални услови (велика влажност ваздуха, кишовито време) могу у великој мери утицати на резултате мерења, пре свега на оне у вези са испитивањем изолационог система (отпор изолације, фактор диелектричних губитака), док у случају електричних отпора намотаја кључни утицај има температура самог намотаја ЕТ и др.

3. МОГУЋИ КВАРОВИ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ЕНЕРГЕТСКИХ ТРАНСФОРМАТОРА

Иако ЕТ генерално представљају поуздане елементе у склопу електроенергетске опреме, кварови се дешавају при чему постоје многи механизми деградације који појединачно или заједничким ефектом утичу на скраћење животног века ЕТ.

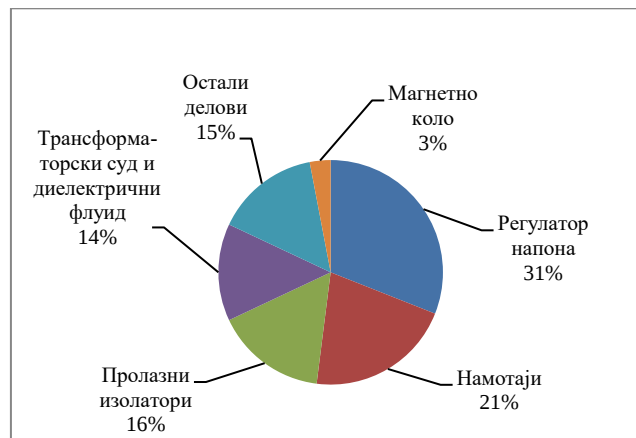
Да би се утврдило стање ЕТ, најпре је неопходно идентификовати режиме квара, као и механизме отказа, затим сагледати њихове последице и интервенције које се могу спровести како до њих не би дошло или како би се отклонили у најкраћем могућем року.

Углавном долази до кварова на активним деловима ЕТ и његовим другим сегментима услед диелектричних, термичких или механичких дефеката. Поврх тога, веома важне компоненте ЕТ, попут пролазних изолатора, теретних или бестеретних регулатора напона, расхладних система, трансформаторског суда, трансформаторског изолационог уља итд., неретко бивају слаба места и узрок кварова или испада из погона самог ЕТ, [3]. Стога је неопходно узети у обзир сваку од компоненти ЕТ појединачно како би се могао обезбедити његов правилан и задовољавајући рад.

Према подацима различитих међународних истраживања и електропривреда пролазни изолатори представљају разлог кварова ЕТ у 5-50% случајева. Они су такође најчешћи узрок пожара на ЕТ при чему могу изазвати огромну штету у разводним постројењима, што их позиционира у прва три места

по питању узрока отказа или испада из погона ЕТ, [4].

На дијаграму приказаном на Слици 1 дата је процентуална заступљеност кварова на ЕТ, према [4].



Слика 1. Процентуални удео кварова појединих елемената ЕТ

4. ПРИМЕРИ ТЕРЕНСКИХ ИСПИТИВАЊА

4.1 Пример 1 – Промена (увећање капацитета и $\text{tg}\delta$) 110 kV пролазног изолатора

Приликом испитивања електричног изолационог система 110 kV пролазног изолатора уочено је значајно погоршање, односно пораст вредности фактора диелектричних губитака ($\text{tg}\delta$), као и драстично увећање капацитета пролазног изолатора ЕТ у фази А у односу на претходно испитивање (Табела I), што указује да је дошло до пробоја кондензаторских облога унутар самог ЕИС-а изолатора, чиме је сигурност даљег погона угрожена. При томе, вредности фактора диелектричних губитака и капацитета осталих пролазних изолатора су задовољавајуће и без одступања у односу на претходна испитивања.

Табела I Мерење фактора диелектричних губитака- $\text{tg}\delta$ и капацитета изолационог система пролазних изолатора, [5, 6]

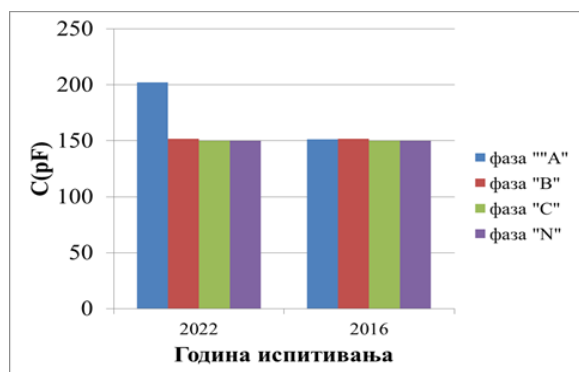
Година испитивања:				2022.		2016.	
Фаза	Фабрички број	U_n (kV)	U_{isp} (kV)	$\text{tg}\delta$ (%)	C (pF)	$\text{tg}\delta$ (%)	C (pF)
A	187064	123	5	1,91	202,24	0,52	151,31
			10	1,87	202,14	0,53	151,29
B	187062	123	10	0,44	151,66	0,48	151,81
C	187251	123	10	0,45	150,05	0,48	150,07
N	187250	123	10	0,45	149,79	0,47	150,12

Напомена: У табели I - колона за 2022. годину, испитивања вредности $\text{tg}\delta$ (%) и капацитета C (pF) дати за фазу А подвучени су и обојени како би се јасно назначила велика промена вредности $\text{tg}\delta$ (%) и C (pF) у односу на 2016. годину.

На Слици 2 дат је графички приказ вредности $\text{tg}\delta$ по фазама мереним током 2016, односно 2022. године, док је на Слици 3 графички приказан пораст капацитета фазе А у односу на преостале фазе.



Слика 2. Графички приказ вредности tgδ мерене по фазама током 2022. и 2016. године



Слика 3. Графички приказ вредности капацитета мерене по фазама током 2022. и 2016. године

У конкретном случају, као привремено решење препоручена је замена места пролазним изолаторима у звездишту N и фази А јер изолатор у звездишту није напонски оптерећен, до набавке новог изолатора.

4.2 Пример 2 – Увећање електричног отпора намотаја СН 36,75 kV

У Табели II приказани су резултати мерења електричних отпора намотаја СН 36,75 kV ЕТ у дистрибуцији, при чему се јасно види значајно погоршање, односно вишеструко већа међуфазна разлика до које је дошло услед увећања активног отпора у средњој фази. Разлог за увећање отпоре је највероватније у лошем споју извода фазе В намотаја СН и њеног пролазног изолатора. Поменути лош спој свакако представља слабо место, на коме при назначеним вредностима струје долази до грејања и потенцијалног даљег погоршања стања, што може кулминирати евентуалним кваром и испадом ЕТ из погона.

У оваквим ситуацијама препоручује се санација лошег споја у што скорије време. Уколико тренутно не постоји могућност за санацију лошег споја, у наставку погона препоручује се термовизијска контрола и узимање узорка уља за ГХ анализу, као и даља поопштрена контрола у виду мерења омских отпора СН намотаја најкасније након годину дана погона како би се пратило стање.

Табела II Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпора фаза намотаја 36,75 kV, [7, 8]

Година испитивања	Спој:	a-n	b-n	c-n	$\Delta R/R$
	I (A)	R (mΩ)	R (mΩ)	R (mΩ)	
2022.	10,0	114,41	133,00	114,260	16,40
2016.	10,0	113,36	113,13	113,22	0,20

Напомена: У Табели II највећа међуфазна разлика отпора $\Delta R/R$ (%) за 2022. годину подвучена је и обојена како би се јасно назначио велики пораст $\Delta R/R$ (%) у односу на испитивање из 2016. године.

4.3 Пример 3 – Прекид бирачког дела бестеретне регулационе преклопке са фазом С намотаја 35 kV

Електрична испитивања ЕТ 4 MVA, 35/10,5 kV извршена су у смислу дефектаже, а иницирана су његовим испадом због прораде Бухолц релеја. На узорку уља узетом из ЕТ након његовог испада извршена је гаснохроматографска анализа и утврђено присуство гасова квара типа електричног пражњења мале густине енергије.

Најпре је извршено мерење изолационих отпора (Табела III), чиме је утврђено да су вредности изолационих отпора ЕИС намотаја ВН ЕТ испод препоручених граничних вредности у споју према маси за назначени напонски ниво што значи да се не може очекивати сигуран погон.

Табела III Мерење изолационих отпора изолационог система намотаја ЕТ

Мерни спој	Изолациони отпори		
	R _{60"} (MΩ)	N (-)	U _{isp} (kVdc)
ВН : НН (М)	20500	2,20	5
ВН : М (НН)	278	0,69	5
	113,2	0,91	10
НН : М (ВН)	10220	1,94	5

Напомена: ВН – намотај 35 kV, НН – намотај 10,5 kV, М – уземљени магнетно коло и трансформаторски суд. Вредности отпора изолације мереног у шездесетој секунди, R_{60"} (MΩ), и коефицијент апсорпције, N, дате за мерни спој ВН : М (НН), обојене су у Табели III како би се нагласиле њихове ниске вредности.

Ниске и незадовољавајуће вредности изолационих отпорности, као и коефицијената апсорпције, у мерном споју ВН : М највероватније су последица таложења гаражи и продуката насталих услед електричних пражњења унутар ЕТ.

Потом је извршено мерење струја и снага празног хода. Приликом мерења струја магнећења и губитака празног хода у спојевима А-ВС и В-АС добијене су очекиване вредности струја магнећења (у mA), док у споју С-АВ струја магнећења није практично ни

успостављена, што је навело на сумњу да постоји прекид у фази С, па се одмах приступило мерењу омских отпора намотаја како би се потврдила исказана сумња. Резултати мерења струја магнетнећа уз напајање са ВН стране нису указивали на постојање међузавојних кратких спојева намотаја нити дефеката магнетног кола.

Мерењем електричних (омских) отпора намотаја ВН најпре је измерена вредност у споју А-В која је износила 2902 mΩ. У спојевима В-С и С-А није могла да се успостави струја, што је потврдило сумњу да негде у фази С постоји прекид. Мерења су вршена у позицији бр. 3 БРП. Затим је извршено померање БРП-а кроз све позиције и мерењем електричних отпора је утврђено да бирачки део БРП-а није у споју са фазом С намотаја 35 kV.

На основу резултата електричних испитивања закључено је да ЕТ није способан за даљи погон, [9].

4.4 Пример 4 – Увећање електричног отпора намотаја ВН 35 kV

На дистрибутивном ЕТ 4 MVA, 35/10,5 kV извршена су електрична мерења услед реаговања Бухолц релеја. Мерење изолационих отпора, као и струја магнетнећа и губитака празног хода дало је задовољавајуће резултате, па се приступило мерењу електричних отпора намотаја.

Приликом мерења електричних отпора намотаја ВН добијене су међуфазне разлике отпора знатно преко препорученог граничног одступања, чак 103% (Табела IV).

Табела IV Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпора фаза намотаја 35 kV, [10]

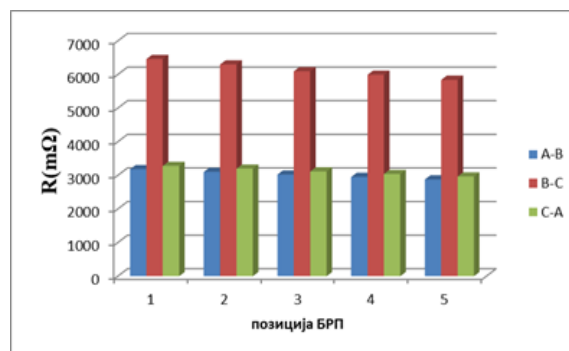
Положај БРП	Спој:	A-B	B-C	C-A	$\Delta R/R$
	I (A)	R (mΩ)	R (mΩ)	R (mΩ)	
1	5,0	3182,4	6460,5	3279,20	103,01
2	5,0	3103,4	6300,0	3197,60	103,0
3	5,0	3024,2	6096,5	3116,00	101,59
4	5,0	2951,2	5991,0	3041,20	103,00
5	5,0	2878,2	5841,5	2965,60	102,96

Напомена: БРП – бестеретна регулациона преклопка. Вредности електричних отпора намотаја у споју В-С и највеће међуфазне разлике отпора $\Delta R/R$ (%) у Табели IV подвучене су и обојене у циљу наглашавања тих вредности.

Мерењем у сваком положају БРП утврђено је да разлог за увећане отпоре није у контактима БРП-а, узимајући у обзир да у свим позицијама постоји значајно увећан отпор у мерном споју В-С, што наводи на закључак да постоји лош спој извода фазе В и њеног пролазног изолатора.

Даљи погон ЕТ у оваквом стању се нипошто не препоручује, јер при назначеним струјама оптерећења може доћи до прегревања наведеног споја и даљег кумулативног процеса погоршања стања, које у драстичном случају може да доведе до прегоривања споја. Препоручена је интервенција/поправка на намотају ВН у првом могућем термину.

На Слици 4 графички су приказани резултати мерења електричних отпора из Табеле IV при чему се јасно види значајно искакање вредности електричног отпора у споју В-С.



Слика 4. Графички приказ апсолутних вредности електричних отпора у наведеним спојевима

Да би се увидело колико је погоршање у питању, у Табели V приказани су резултати мерења електричних отпора ВН намотаја на истом ЕТ неколико година уназад. Може се закључити да су постојале назнаке зачећа наведеног лошег споја, при чему је очигледно дошло до кулминације током дужег низа година редовног рада што је резултовало испадом ЕТ из погона.

Табела V Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпорности фаза намотаја 35 kV неколико година уназад, [11-14]

Година испитивања	Пол. БРП	Спој	A-B	B-C	C-A	$\Delta R/R$
		I (A)	R (mΩ)	R (mΩ)	R (mΩ)	
2015.	4	10	2144,4	2185,6	2161,0	1,92
2013.	4	3	2165,3	2212,3	2182,0	2,17
	4	5	2162,0	2212,0	2185,4	2,31
2012.	4	4	2110,4	2198,9	2141,4	4,19
	4	12	2107,4	2175,6	2134,0	3,24
2009.	4	3	2109,7	2156,3	2136,0	2,21

4.5 Пример 5 – Кулминација увећаног електричног отпора намотаја СН 36,75 kV која је резултовала испадом ЕТ из погона

Наводимо и пример шта се дешава када се након лоших резултата мерења електричног отпора намотаја (међуфазна разлика отпора износила преко 60%) не

реагује правовремено и ЕТ се остави у погону без вршења потребне санације лошег споја на који је указивано.

Наиме, на ЕТ за потребе дистрибуције електричне енергије, снаге 20 MVA, 110/36,75/10,5 kV извршена су ванредна електрична мерења 2023. године након испада трансформатора из погона деловањем диференцијалне заштите. Најпре се приступило испитивању изолационог система. Резултати мерења електричног изолационог система намотаја ЕТ указивали су на грубе промене намотаја СН 36,75 kV што је приказано у табели испод уз дато поређење са вредностима из 2018. и 2022. године.

Табела VI Измерене вредности фактора диелектричних губитака - $\tan\delta$ и капацитета - C у мерним спојевима СН : НН и СН : М [15, 16, 17]

Година испитивања		2018.		2022.		2023.	
Мерни спој	$U_{\text{иср}}$ (kV)	$\tan\delta$ (%)	C (pF)	$\tan\delta$ (%)	C (pF)	$\tan\delta$ (%)	C (pF)
СН:НН (ВН+М)	10	0,27	8,6082	0,27	8,6368	<u>99,9</u>	/
СН:М (ВН+НН)	10	0,69	0,9211	0,58	0,9174	<u>1,51</u>	<u>6,0293</u>

Из Табеле VI јасно се види екстремна промена вредности фактора диелектричних губитака мереног 2023. године, док капацитет није било могуће измерити за спој СН : НН, док је у споју СН : М израженија промена капацитета што одмах наводи на закључак да постоји груба промена СН намотаја.

Затим се наставило са електричним испитивањима при чему се мерењем струја и снага празног хода у фази mC није могла успоставити струја што је указивало на потенцијални прекид намотаја у наведеној фази намотаја 36,75 kV.

Мерењем електричних отпора намотаја у наведеној фази такође није могла да се успостави струја што је само потврдило сумње.

Интересантно је да су мерења електричних отпора намотаја 36,75 kV 2018. и 2022. године (Табела VII)

указивала на лош спој управо у фази mC уз максималну међуфазну разлику отпора преко 60%, а стање ЕТ оцењено као незадовољавајуће и препоручена је поправка, односно санација у што краћем року. Резултати хемијске анализе узорка уља из 2022. године указивали су на постојање локалног прегревања унутар ЕТ са оценом Б, односно сумњом на постојање квара што је одмах повезано са високим вредностима електричног отпора у фази mC.

Табела VII Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпора фаза намотаја 36,75 kV, [15,16]

Година испитивања	Спој:	mA-mN	mB-mN	mC-mN	$\Delta R/R$ (%)
	I (A)	R (m Ω)	R (m Ω)	R (m Ω)	
2022.	20,0	120,4	124,1	<u>199,90</u>	<u>66,03</u>
2018.	19,9	121,95	125,70	<u>204,630</u>	<u>67,80</u>

Напомена: Вредности електричних отпора намотаја у споју mC-mN и највеће међуфазне разлике отпора $\Delta R/R$ (%) у Табели VII подвучене су и приказане црвеним фонтом у циљу наглашавања тих вредности.

4.6 Пример 6 – Оштећење намотаја 35 kV дистрибутивног ЕТ 12,5 kVA, 35/21 kV

ЕТ из овог примера је искључен из погона деловањем Бухолц релеја. Према резултатима ГХ анализе узорка уља достављеног након испада утврђене су високе концентрације свих угљоводоничних гасова, а посебно је висока концентрација ацетилена (C_2H_2) који је карактеристичан за електрично пражњење високе енергије са појавом лука, при коме се развијају температуре преко 1000°C (Табела VIII) с тим што је ЕТ оцењен незадовољавајућом оценом Ц.

Табела VIII Резултати ГХ анализе уља ЕТ, [18, 19]

Година	$T_{\text{уља}}$	Појединачне концентрације гасова у уљу, ppm								
	°C	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
2022.	/	430	438	<u>192</u>	2386	523	530	3944	24707	64543

Уследила су ванредна електрична испитивања са циљем покушаја дефектаже предметног трансформатора. Прво су урађена испитивања карактеристика ЕИС-а намотаја ЕТ (Табела IX). Извршено је мерење отпора изолације и на први поглед, што није редак случај, резултати нису указивали

на проблем у изолационом систему – поређења ради дате су и вредности параметара ЕИС измерене приликом редовног испитивања у 2022. години. Измерене вредности отпора изолације у све три спреге су биле високе и нису изразито одступале од претходно измерених.

Табела IX Мерење изолационих отпора, фактора диелектричних губитака $\tan\delta$ и капацитета ЕИС намотаја ЕТ

Мерна спрега	2022. (47°C)		2023. (31°C)	
	R_{60° (M Ω)	$\tan\delta$ (%)	C (nF)	R_{60° (M Ω)
35:21	17070	0,44	6,2354	9530
35:M	23900	0,21	1,5956	12100
21:M	11590	0,67	5,6389	6680

Следеће испитивање било је мерење струје магнећења и губитака празног хода при малом напону (Табела X). На бази резултата овог испитивања одмах је са великом вероватноћом претпостављено да је дошло до пробоја међунавојне изолације неког од намотаја на стубу А.

Табела X Мерење струја магнећења и губитака празног хода при малим напонима са стране 35 kV

Мерна спрега	A-BC		B-CA		C-AB	
	I_0 (mA)	P_0 (W)	I_0 (mA)	P_0 (W)	I_0 (mA)	P_0 (W)
Година						
2022.	18,10	2,245	12,36	1,552	11,94	1,537
2023.	1618,0	117,7	1613,0	117,5	12,33	1,549

Струје магнећења у мерним спрегама A-BC и B-CA, у којима је у активан намотај на стубу фазе А, 100 пута су већег реда од нормалних вредности које су измерене приликом редовног испитивања овог ЕТ у 2022. (резултати дати у првом реду Табеле X).

Коначна потврда претпоставке да је дошло до пробоја међунавојне изолације намотаја 35 kV на стубу фазе „А” добијена је наком мерења електричних отпора намотаја у затеченом положају 3 бестеретне регулационе преклопке (БРП). У Табели XI дати су резултати мерења електричних отпора намотаја 35 kV у затеченом положају 3 БРП, односно намотаја 21 kV, као и резултати мерења из 2022. године приликом редовног периодичног испитивања.

Табела XI Измерене апсолутне вредности и максималне релативне међуфазне разлике отпора намотаја 35 kV и 21 kV

Намотај	год.	I_{DC} (A)	БРП	R_{A-B} (m Ω)	R_{B-C} (m Ω)	R_{C-A} (m Ω)	δR (%)
35 kV	2022	10A	2	481,0	469,7	489,3	4,15
	2023	10A	3	1161,5	581,8	580,75	≈100
21 kV	2022	10A	-	63,080	62,690	63,09	0,64
	2023	10A	-	62,565	62,265	62,77	0,81

Види се да је електрични отпор намотаја у мерној спрези A-B намотаја 35 kV стуба фазе А двоструко већи од отпора намотаја на преостала два стуба В и С

што говори у прилог да је вероватно дошло и до прекида између два полунамотаја који су у паралелној спрези. ЕТ свакако није био за даљи погон и препроучен је транспорт у сервисну радионицу на преглед и санацију. Након отварања и прегледа потврђени су налази електричних испитивања и претпоставка места квара што може да се види на приложеним сликама 5 и 6.



Слика 5. Налаз приликом отварања и прегледа ЕТ у сервисној радионици



а)



б)

Слика 6. а) и б) – Налаз приликом отварања ЕТ – прегорели контакти БРП

5. ЗАКЉУЧАК

Идеја рада је да се примерима из праксе са теренских електричних испитивања укаже на значај превентивних дијагностичких мерења чија је намена да покажу у каквом се тренутно стању налази ЕТ све то у циљу предупређења нежељених кварова и предузимања правовремених акција зарад обезбеђивања нормалног, правилног и поузданог функционисања ЕТ као једног од најбитнијих елемената производно-преносног и дистрибутивног електроенергетског система. Дешава се да престанак рада ЕТ након деловања одређене заштите буде последица неког квара унутар ЕТ који се манифестује и кроз саме резултате електричних испитивања, где се јасно види шта је довело до испада ЕТ из погона, а сам закључак о погонској спремности ЕТ доноси се на основу резултата мерења која су показатељ његовог стања.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Diagnostic Testing and Monitoring of Power Transformers Brochure – <https://www.omicronenergy.com/en/application/offline-testing/power-transformer/#>
- [2] 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.
- [3] CIGRE TB 761 Condition Assessment of Power Transformers
 - [4] CIGRE TB 755 Transformer Bushing Reliability
 - [5] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 422421-Л
 - [6] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 416454-Л
 - [7] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 422294-Л
 - [8] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 416370-Л
 - [9] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 422071-Л
 - [10] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 422525-Л
 - [11] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 415539-Л
 - [12] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 413377-Л
 - [13] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 412482-Л
 - [14] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 409342-Л
 - [15] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 418271-Л
 - [16] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 422417-Л
 - [17] Извештај ЕТИ „Никола Тесла” бр. 423345-Л
 - [18] IEC60599-2015 Ed.3 Mineral Oil-filled Electrical Equipment in Service – Guidance on the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis, 82 pages
 - [19] Извештај о испитивању узорка трансформаторског уља бр. 422439-Л хемијске лабораторије ЕТИ „Никола Тесла”

БИОГРАФИЈЕ



Момчило Милић је рођен 1992. године у Книну, Хрватска. Завршио је Основну школу „Доситеј Обрадовић” на Умки као носилац Дипломе „Вук Караџић”. Затим је завршио Електротехничку школу „Никола Тесла” у Београду на Одсеку за рачунаре (електротехничар рачунара), такође као носилац Дипломе „Вук Караџић”. Године 2011. уписује основне студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, а 2015. на истом дипломира на тему „Анализа рада ударног струјног генератора”. Године 2016. завршава мастер студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на тему „Примена методе фреквенцијски зависне спектроскопије у превентивној контроли влаге у изолацији високонапонске опреме”. Од априла 2016. године запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла” у Београду где се претежно бави испитивањем високонапонске опреме у склопу превентивних електричних испитивања.

Марко Димитријевић је рођен 1997. године у Ваљеву. Основне студије завршио је на Електротехничком факултету у Београду 2021. године, док је мастер студије завршио 2022. године. Запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла” као инжењер сарадник од 2022. године.

Ђорђе Јовановић је рођен 1966. године. Основну и средњотехничку школу завршио је у Београду, дипломирао 1995. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Од 1996. године запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла”, у Центру за електромерења. Од почетка своје професионалне каријере, тј. готово 30 година, бави се испитивањем изолационог система, феноменима и механизмима старења и утицајем различитих фактора на погонску спремност изолационог система електроенергетских уређаја – енергетских и мерних трансформатора, обртних машина. Председник је СТК А2 и члан СТК А1 CIGRE Србија. Аутор је и коаутор више десетина стручних радова на домаћим и иностраним конференцијама.

Владимир Остраћанин је рођен 1981. године у Брвенику код Рашке. Дипломирао је 2005, а магистрирао 2010. године на Техничком факултету у Чачку. У „Електросрбији” Краљево запослен је од 2005. на пословима инвестиција у ДЕЕС-у, а након тога у процесу одржавања ДЕЕС-а до данас, где тренутно обавља функцију техничког директора дистрибутивног подручја Краљево „Електропривреда Србије”. У периоду од 2005. до 2016. године био је ангажован на Техничком факултету у Чачку и Факултету техничких наука у Новом Саду као сарадник у настави, на предметима из групе предмета Електричне машине.

Momčilo J. Milić¹, Marko Dimitrijević¹,
 Đorđe E. Jovanović¹, Vladimir Ostraćanin²



Detection of Faults and Condition Deterioration of Power Transformers through Preventive On-site Electrical Testing – Examples and Experiences from Practice

¹ Nikola Tesla Institute of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia*

² Power Distribution Company of Serbia, Belgrade, Serbia

Professional article

Highlights

- The importance of reliable operation of electrical transformers for the stability of the entire power system
- The significance of preventive electrical testing of electrical transformers in terms of preserving them and extending their lifespan
- Preventive testing, along with adequate monitoring and diagnostics, of electrical transformers as a tool for preventing potential failures through appropriate response

Abstract

Power transformers are one of the most crucial components for the generation, transmission, and distribution of electrical energy. The stable and reliable operation of the entire power system cannot be ensured without guaranteeing the normal functioning of these transformers. Hence, it is essential to devote adequate attention to preventive electrical testing to gain better insight into their condition, to avoid and prevent unwanted faults, and thus ensure uninterrupted power supply and meet consumer demand for electricity. Nevertheless, due to various factors, power transformers can sometimes fail. Therefore, there is a significant need for electrical testing, which provides assurance regarding the critical elements of the power system. Electrical measurements conducted on power transformers, as a part of the monitoring and diagnostics of high-voltage equipment, offer valuable information and provide exact picture of their overall condition. By examining the condition of various power transformer components, such as the electrical insulation system of windings and bushings, load or no-load tap changers, magnetic core, and the windings themselves, we obtain significant information that can help us to respond in a timely manner and to avoid failures or potential disruptions in the generation and transmission of electrical energy. This paper will present examples of electrical testing results where faults and deteriorations in certain parameters were detected. That has been done during routine or extraordinary preventive diagnostic testing of power transformers using modern methods. The paper emphasize the importance and need for electrical testing of high-voltage equipment, in order to ensure the safe and reliable operation of the entire power system.

Keywords

Electrical insulation system, Electrical testing, Power transformers

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Examples of Finding Faults and Deterioration of Certain Parameters on Power Transformers as Part of Preventive Electrical On-site Tests", awarded by Expert Committee EC-A2 Power Transformers at the 36th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, May 22-26, 2023

Received: September 3rd, 2024 Reviewed: October 3rd, 2024

Modified: October 7th, 2024 Accepted: October 11th, 2024

* Corresponding author: Momčilo J. Milić, +381648243869

E - mail: milicmomcilo92@gmail.com

