

Процјена исплативости ремонта дистрибутивних трансформатора помоћу *fuzzy* одлучивања

Немања Панџић

Електроинвест д.о.о, Источно Сарајево
Електротехнички факултет, Универзитет у Источном
Сарајеву
Источно Сарајево, Република Српска, БиХ
nemanjapandzic@hotmail.com

Петар Матић

Катедра за електроенергетику
Електротехнички факултет, Универзитет у Бањој Луци
Бања Лука, Република Српска, БиХ
petar.matic@etf.unibl.org

Сажетак—У раду је предложен поступак за процјену исплативости ремонта дистрибутивних енергетских трансформатора заснован на примјени *fuzzy* логике. Обрађени су кварови који се најчешће јављају у пракси и поступци који се примјењују при ремонту, те је дата њихова класификација и дефинисани су одговарајући тежински коефицијенти. На основу тако формираног модела развијен је *fuzzy* логички алгоритам помоћу којег се процјењује исплативост ремонта, односно потреба за замјеном трансформатора који је у квару новим. Резултати добијени предложеним алгоритмом могу да послуже као први корак при доношењу одлуке о предстојећим поступцима ремонта трансформатора у квару, а он је илустрован на неколико типичних примјера из праксе.

Кључне ријечи: дистрибутивни енергетски трансформатор, ремонт и испитивање, *fuzzy* логика

I. УВОД

Енергетски трансформатори су једни од најраспрострањенијих електромагнетних апарата [1]. Као основни елементи дистрибутивних мрежа, трофазни дистрибутивни трансформатори се користе за међусобно везивање средњенапонске и нисконапонске дистрибутивне мреже и од свих врста трансформатора у електроенергетском систему су највише заступљени.

Узроци појаве кварова у дистрибутивним трансформаторима могу бити различите природе. Најчешћи су: повишена електрична напрезања изолације трансформатора усљед атмосферских или погонских пренапона у мрежи, повишена механичка напрезања због динамичких сила код кратких спојева, напони већи од номиналних, струјна преоптерећења која трају дуже од допуштеног трајања усљед чега долази до интензивног загријавања и оштећења изолације намотаја, као и старење самог трансформатора.

Кварови активних дијелова трансформатора (намотаји, регулациона склопка, магнетно језгро) су неповољни са становишта корисника електричне енергије. Они се, углавном, не могу санирати на терену, јер њихово отклањање подразумијева демонтажу трансформатора и извлачење активног дијела због приступа мјесту квара,

осим ако је оштећење мањег обима. За отклањање сложенијих кварова потребно је трансформатор доставити у неки од стручних сервиса.

Када се на трансформатору појави квар, неопходно је што прецизније одредити степен оштећења трансформатора, на основу чега се доноси одлука о поправци оштећеног трансформатора, или набавци новог, ако се установи да је квар већег обима.

У наставку рада ће бити описани кварови који се најчешће јављају у пракси код дистрибутивних трансформатора, одговарајући поступци при њиховом ремонту, критеријуми за процјену исплативости ремонта, те поступак за израду једног *fuzzy* логичког контролера који може помоћи при доношењу одлуке о поправци постојећег или замјени трансформатора новим. Резултати примјене предложеног контролера илустроваће се на два примјера из праксе.

II. КВАРОВИ ДИСТРИБУТИВНИХ ТРАНСФОРМАТОРА

Оштећења намотаја трансформатора настају из више разлога (кратки спојеви између намотаја или извода из трансформатора према уземљеним дијеловима, међузавојни кратки спојеви намотаја исте фазе, међуфазни кратки спојеви у трансформатору или на изводима из њега, пробој изолације између намотаја примара и секундара који се налазе на истом стубу, пробој изолације намотаја трансформатора према магнетном језгру и трансформаторском суду, лош спој између намотаја и извода намотаја, итд.). Мјесто квара се може прецизно одредити визуелним прегледом и електричним мјерењима (отпора намотаја, отпора изолације, итд.). Искусвеним познавањем очекиваних вриједности и њиховим поређењем са измјереним резултатима код трансформатора у квару, да се установи који су намотаји оштећени.

Регулациона склопка, као једини покретни дио трансформатора, је изложена различитим процесима деградације, као што су стварање наслага угљеника на контактима, механичко оштећење контаката, стварање непроводних наслага уља. [2]. Кварови регулационе склопке могу бити механичке (попуштање опруга усљед

великог броја манипулација што узрокује лоше спојеве) и електричне (кратки спој између регулационих отцјепа што може довести и до физичких оштећења).

Кварови магнетног језгра трансформатора спадају у најсложеније због тога што је за њихово рјешавање потребно раставити комплетан активни дио трансформатора. Узроци кварова на језгру могу бити различите природе. Сам природни процес старења материјала временом доводи до оштећења лимова. Уколико се деси да трансформатор током рада остане без уља, дијелови магнетног језгра који су изнад површине уља у трансформатору су подложни утицају корозије. Приликом страдавања намотаја дешава се и да бакрени опиљци приону уз магнетне лимове смањујући тако њихову функционалност.

Кварови на трансформаторском суду и осталим помоћним дијеловима су главни разлог истицања уља из трансформатора. До њиховог оштећења долази старењем материјала (повећана порозност ребара трансформатора, потрошња заптивног материјала) или нестручном монтажом и транспортом (уљоказ, проводни изолатори, Бухолц реле). Цурење уља из трансформатора ће се осим на мјесту физичког оштећења десити и на сваком спојном мјесту два елемента трансформатора које није квалитетно заптвено бртвеним материјалом.

У току експлоатације трансформаторско уље мијења своје особине под утицајима температуре, ваздуха, влаге, изложености погонским условима рада и старења, итд. Уколико се испитивањем узорка уља из трансформатора открије да је смањена његова функционалност (низак пробнојни напон, промијењена боја и мирис, повећан садржај воде и гасова, итд.) потребно је извршити његову санацију или замјену са новим. Пробојна диелектрична чврстина новог трансформаторског уља треба да буде бар 200 kV/cm, а уља у погону бар 120 kV/cm [3].

III. РЕМОНТ ЕНЕРГЕТСКИХ ТРАНСФОРМАТОРА

Да би се ремонт трансформатора успјешно извршио, неопходно је што прецизније утврдити мјесто квара и обим оштећења. За то је неопходно извршити демонтажу трансформатора да би се приступило активном дијелу и да би се извршио његов детаљан преглед.

Не постоји свеобухватна метода којом би се одредило тачно стање трансформатора, па се зато у ту сврху користи више њих (визуелни преглед, мјерење отпора намотаја, изолације, испитивања у празном ходу и кратком споју, итд.).

Искуство из праксе показује да већина кварова дистрибутивних трансформатора настаје услед оштећења једног или више високонапонских намотаја. Општи кораци које је у пракси неопходно предузети за санацију било ког сложенијег квара на трансформатору су:

- истакање уља из трансформаторског суда у за то предвиђени суд (уље се филтрира и враћа по завршетку поправке и монтаже трансформатора у трансформаторски суд ако се утврди да је његов

квалитет задовољавајући, у супротном је неопходна набавка новог). Унутрашњост и спољашњост трансформаторског суда се пере, одмашћује и суши у потпуности,

- извлачење активног дијела трансформатора и његов преглед,
- што тачније лоцирање мјеста квара,
- демонтажа активног дијела,
- отклањање утврђеног квара (израдом једног, два или три високонапонска или нисконапонска намотаја, отклањање било којег физичког оштећења на елементима за дотезање магнетног језгра и самог језгра, санација регулационе склопке, итд.),
- поновна монтажа активног дијела,
- контролно испитивање и сушење активног дијела трансформатора,
- монтажа трансформатора и замјена свог оштећеног заптивног материјала,
- антикорозивна заштита (фарбање),
- завршна испитивања комплетираног трансформатора.

Ако се установи да је оштећен високонапонски намотај, исти се уклања са трансформатора. По уклањању врши се његово снимање (мјерење пресека жице којом је израђен и одређивање броја навојака одмотавањем на специјализованој машини). Израда новог намотаја се одвија намотавањем жице идентичног пресека док се не дође до броја забиљежених навојака при снимању. По изради намотаја трансформатор се саставља и комплетира. При изради новог намотаја мора се водити рачуна да димензијама што више одговара оригиналном намотају, јер у супротном може да настане проблем при монтажи трансформатора због недостатка довољног простора.

Висконапонски намотаји дистрибутивних енергетских трансформатора се израђују од лакиране жице кружног пресека пречника $0,7 \pm 1,15$ mm за трансформаторе снаге 50 kVA па до 3 mm за трансформаторе снаге 630 kVA која је широко доступна. Количина жице зависи од величине, тј. снаге дистрибутивних трансформатора и у просјеку износи од неких десетак килограма по намотају за трансформаторе снаге 50 kVA до шездесетак килограма за трансформаторе снаге 630 kVA.

Кварови нисконапонских намотаја се јављају рјеђе у пракси, а рјешавају се идентично као и кварови високонапонских намотаја. Њихова већа сложеност потиче од тога што су израђени од профилне жице (жице правоуглог пресека са заобљеним ивицама заштићеној са неколико слојева изолационог папира) коју је пуно теже набавити од стандардне лак жице округлог пресека за израду високонапонских намотаја.

Кварови на регулационој склопци се отклањају санацијом оштећених мјеста те чишћењем и дотезањем контаката и опруга. Уколико санација постојеће регулационе склопке није изводљива, иста се може замијенити идентичном исправном која се може наручити код произвођача трансформатора или се може одстранити са одговарајућег расходованог трансформатора који је ван

употребе. Ако санација регулационе преклопке није могућа због великог обима оштећења, а нова се не може набавити, склопка се може избацити из употребе кратким спајањем одговарајућих отцјена намотаја тако да преносни однос трансформатора одговара номиналном, што је и најнеповољнија опција, јер трансформатор тако остаје без могућности регулације напона.

Процес санације оштећеног магнетног језгра трансформатора подразумева његово потпуно растављање. Ако је квар проузроковао топљење лимова и спајање бакарним опилцима, стопљена мјеста је потребно изрезати и поново изоловати лимове и расподјелом оштећених лимова на разна мјеста у језгру избјећи превелико повећање индукције. Поправак магнетног језгра трансформатора је веома тежак и дуготрајан, па је зато скуп, те обично представља главни разлог за одлуку да се одустане од поправке трансформатора и крене у процес набавке новог.

Кварови помоћних дијелова трансформатора (бртвеног материјала, уљоказа, проводних изолатора, Бухолц релеа, итд.), се рјешавају тако што се испусти уље из трансформатора до потребног нивоа, па се потом врши демонтажа оштећених дијелова и уградња нових идентичних.

Санација трансформаторског уља се обавља обрадом у посебној машини за филтрирање, центрифугирање и сушење (жарг. центрифуга). Могућност санације уља одређује степен онечишћености и његова старост. У случајевима када није могуће извршити санацију постојећег уља, врши се замјена старог уља новим.

IV. КРИТЕРИЈУМИ ЗА ПРОЦЕНУ ИСПЛАТИВОСТИ РЕМОНТА

На одлуку о избору између поправке или набавке новог трансформатора, осим степена оштећења постојећег трансформатора, утичу и [4]:

- оцјена општег стања трансформатора (процјена општег стања, историје одржавања и евентуалних претходних проблема),
- процијењени трошак поправке у односу на набавку новог (низак/средњи/висок),
- старост трансформатора (старији трансформатори су подложнији кваровима, замјенски дијелови се теже налазе, тако да је често оправдана замјена старог трансформатора),
- ефикасност (старији трансформатори обично имају мању ефикасност него нови),
- доступност резервних дијелова (ако су резервни дијелови иначе скупи и тешко доступни, боље је замијенити трансформатор),
- експлоатациони услови (ако постојећи трансформатор не задовољава постојеће захтјеве, нпр. по излазној снази, опсегу регулације напона, итд. боље га је замијенити),
- усаглашеност са прописима и документација (уколико трансформатор не задовољава постојеће захтјеве, или му је документација непотпуна/неодговарајућа, боље га је замијенити),

- трајање прекида (колико ће ремонт трансформатора утицати на трајање прекида напајања, ако не постоји замјенски, а лакше је набавити нови),
- напредак технологије (уколико је трансформатор од већег значаја, а на располагању је трансформатор са напредним уређајима нпр. за дијагностику и управљање, боље га је замијенити),
- укупни трошкови (поређење трошкова одржавања, губитака и рециклаже старог са одговарајућим трошковима новог трансформатора).

У табели I су дате најзначајније врсте кварова које се јављају на дистрибутивним трансформаторима којима је придружен тежински фактор са вриједностима од 1 до 5, гдје ниже вриједности одговарају мањим оштећењима, а више вриједности већим оштећењима.

ТАБЕЛА I: КВАРОВИ И ТЕЖИНСКИ ФАКТОРИ

Ред. Бр.	Кварови и тежински фактори		
	Врста квара	Опис	Вриједност
1.	Оштећење суда трансформатора	једноставан	1
2.	Оштећење заптивног материјала	једноставан	1
3.	Оштећења помоћних дијелова трансформатора (уљоказ, Бухолц реле, термометар, проводни изолатори, итд.)	једноставан	1
4.	Оштећења високонапонског намотаја	једноставан	2
5.	Оштећења регулационе склопке	једноставан	2
6.	Оштећења нисконапонског намотаја	сложен	3
7.	Оштећења магнетног језгра	сложен	4
8.	Комбинација више кварова (нпр. нисконапонски намотај и магнетно језгро)	сложен	5

V. ПРИМЈЕНА FUZZY ЛОГИКЕ ЗА ПРОЦЕНУ ИСПЛАТИВОСТИ РЕМОНТА ТРАНСФОРМАТОРА

Fuzzy логика је савремена дисциплина, која је нашла широку примјену у техничким, медицинским, економским и другим доменима. Њена основна примјена је у системима одлучивања и управљања који се не могу експлицитно моделовати.

Fuzzy логика омогућава доношење конкретних закључака на основу недовољно одређених улазних информација и представља једну врсту вјештачке интелигенције. Користи се за представљање људског знања и закључивања помоћу математичког формализма за описивање нејасности, неодређености или двосмислености, а у инжењерству за описивање стања и услова неодређених појмова који су скоро увијек повезани са количином [5].

Специфичност *fuzzy* система одлучивања је стављање у први план стручњака и тежњу да се његово знање представи и обради помоћу рачунарског програма. То је идеја да се по узору на човјеков постепен и „мек“ начин размишљања развију рачунарски модели који ће више одговарати човјеку. Овај начин тумачења појава је различит од стандардног начина коме је основна особина тежња за прецизношћу и егзактношћу [5].

Постоји више поступака за израду *fuzzy* контролера, од којих се највише користи контролер Мамдани типа. Поступак израде Мамдани *fuzzy* контролера одвија се у пет корака [5]:

- идентификација улазних величина, њиховог броја, опсега и одговарајућих описних термина,
- идентификација излазних величина, њиховог броја, опсега и одговарајућих описних термина,
- дефиниција функција припадности описних термина за сваку улазну и излазну промјенљиву,
- конструкција одговарајућих *fuzzy* правила типа *If-Then* између улазних и излазних промјенљивих и
- одабир методе за примјену *fuzzy* логичких оператора и одговарајуће методе дефазификације.

За правилну примјену *fuzzy* логике од кључне је важности дефинисање одговарајућих функција припадности μ за дати *fuzzy* скуп.

Поједини елементи могу да припадају скупу или подскупу у мањој или већој мјери, као и да истовремено припадају и у више подскупова. За разлику од класичних скупова, мјера припадности *fuzzy* скупу је интервал.

Најчешће коришћене функције припадности су троугаона (*trimf* од енгл. *Triangular Membership Function*) и трапезоидна (*trapmf* од енгл. *Trapezoidal Membership Function*). За одабир типа функција припадности користе се експертска знања и искуство [5].

Fuzzy логичко закључивање је поступак којим се на основу *fuzzy* правила одређује одговарајућа вриједност излазне величине. Максималан број правила једнак је укупном броју комбинација улазних величина (у конкретном примјеру $4 \times 4 = 16$), али се потребан број правила мора пажљиво одабрати, како би се избјегло њихово засићење [5].

Последњи корак при изградњи система за *fuzzy* закључивање је дефазификација. Њена сврха је да се *fuzzy* закључак претвори у један реалан број, који представља одговарајућу контролну акцију или одлуку. Најзначајнија метода за дефазификацију излазне *fuzzy* варијабле настале преклапањем површина одговарајућих промјенљивих је метода центра гравитације [6].

Недостаци се појављују ако не постоји довољно преклапање *fuzzy* подскупова. Тада се добија контролна акција слична Буловој логици и губе се предности *fuzzy* приступа. У супротном случају, при превеликом преклапању *fuzzy* скупова, долази до нејасноћа, односно засићења контролера, те се губи прецизност контролне акције [5].

Fuzzy логички контролер (једноставан програм на бази *fuzzy* логике) за доношење одлуке о поправци оштећеног трансформатора или набавци новог је реализован у програмском пакету Матлаб и садржи четири улазне и једну излазну величину.

Кључна особина улазних и излазних величина је једноставно превођење описних знања (која се не могу експлицитно изразити) у управљачку акцију. То су квалитативни описи које специфицирају доменски експерти тако што процесе и појаве описују помоћу лингвистичких правила [5]. Овдје су кориштени тежински фактори на основу експертских знања из Табеле I.

Одабране улазне величине *fuzzy* контролера су:

- опште стање трансформатора (историја одржавања, задовољеност радних услова, евентуални претходни проблеми у раду и кварови, визуелни преглед активног дијела трансформатора по отварању, преостали животни вијек.),
- степен оштећења трансформатора,
- цијена новог трансформатора и
- трошкови поправке.

Излазна величина је дискретна одлука: поправка или куповина новог трансформатора којима респективно одговарају функције припадности *поправити* и *купити нов*.

За дефазификацију је одабрана метода центра гравитације.

За све улазне и излазне величине, функције припадности су изабране у опсегу од 0 до 1. Врсте и усвојене вриједности функција припадности су дате у табелама II, III, IV, V и VI.

ТАБЕЛА II: ВРСТЕ И ВРИЈЕДНОСТИ ФУНКЦИЈА ПРИПАДНОСТИ ЗА УЛАЗНУ ВЕЛИЧИНУ ОПШТЕ СТАЊЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Улазна величина	Функције припадности			
	<i>лоше</i>	<i>осредње</i>	<i>солидно</i>	<i>одлично</i>
Опште стање трансформатора	Врсте функција припадности			
	<i>trimf</i>	<i>trapmf</i>	<i>trapmf</i>	<i>trimf</i>
	Параметри функција припадности			
	-0.4 0 0.4	0.1 0.3 0.4 0.6	0.4 0.55 0.65 0.8	0.7 1 1.3

ТАБЕЛА III: ВРСТЕ И ВРИЈЕДНОСТИ ФУНКЦИЈА ПРИПАДНОСТИ ЗА УЛАЗНУ ВЕЛИЧИНУ СТЕПЕН ОШТЕЋЕЊА ТРАНСФОРМАТОРА

Улазна величина	Функције припадности		
	<i>мали</i>	<i>средњи</i>	<i>велики</i>
Степен оштећења трансформатора	Врсте функција припадности		
	<i>trapmf</i>	<i>trimf</i>	<i>trapmf</i>
	Параметри функција припадности		
	-0.36 -0.04 0.04 0.2	0.1 0.5 0.9	0.4 0.56 1.04 1.36

ТАБЕЛА IV: ВРСТЕ И ВРИЈЕДНОСТИ ФУНКЦИЈА ПРИПАДНОСТИ ЗА УЛАЗНУ ВЕЛИЧИНУ ЦИЈЕНА НОВОГ ТРАНСФОРМАТОРА

Улазна величина	Функције припадности		
Цијена новог трансформатора	<i>јефтин</i>	<i>просјечан</i>	<i>скуп</i>
	Врсте функција припадности		
	<i>trimf</i>	<i>trapmf</i>	<i>trimf</i>
	Параметри функција припадности		
	-0.4 0 0.4	0.14 0.46 0.54 0.86	0.6 1 1.4

ТАБЕЛА V: ВРСТЕ И ВРИЈЕДНОСТИ ФУНКЦИЈА ПРИПАДНОСТИ ЗА УЛАЗНУ ВЕЛИЧИНУ ТРОШКОВИ ПОПРАВКЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Улазна величина	Функције припадности		
Трошкови поправке трансформатора	<i>ниски</i>	<i>средњи</i>	<i>високи</i>
	Врсте функција припадности		
	<i>trapmf</i>	<i>trimf</i>	<i>trapmf</i>
	Параметри функција припадности		
	-0.36 -0.04 0.1 0.2	0.1 0.5 0.9	0.6 0.7 1.04 1.36

ТАБЕЛА VI: ВРСТЕ И ВРИЈЕДНОСТИ ФУНКЦИЈА ПРИПАДНОСТИ ЗА ИЗЛАЗНУ ВЕЛИЧИНУ ПОПРАВКА ИЛИ КУПОВИНА НОВОГ ТРАНСФОРМАТОРА

Излазна величина	Функције припадности		
Поправка или куповина новог трансформатора	<i>поправити</i>	<i>размислити</i>	<i>купити нов</i>
	Врсте функција припадности		
	<i>trapmf</i>	<i>trimf</i>	<i>trapmf</i>
	Параметри функција припадности		
	-0.36 -0.04 0.2 0.4	0.1 0.5 0.9	0.6 0.8 1.04 1.36

Одабрана *If-Then* правила су дефинисана по сљедећим принципима:

- ако је опште стање трансформатора добро (не постоји историја кварова, активни дио је у добром стању), степен оштећења мали (оштећен само један високонапонски намотај, што је чест случај), а трошкови поправке ниски у односу на набавку новог, поправка трансформатора је добар избор,
- ако је опште стање трансформатора осредње, степен оштећења већи од очекиваног, а трошкови поправке нису мали, потребно је размислити између поправке постојећег и набавке новог трансформатора,
- ако је опште стање трансформатора лоше, степен оштећења велик и трошкови поправке високи, неопходно је купити нов трансформатор,
- ако је цијена новог трансформатора повољна, чак и у ситуацијама гдје је поправка могућа, пожељно је купити нов трансформатор,
- ако су трошкови поправке повишени услед губитака узрокованим дуготрајним процесом поправке, уз прихватљиву цијену, пожељно је купити нов трансформатор и
- ако је и при солидном стању трансформатора поправка могућа, у случајевима када је животни

вијек трансформатора пред истеком, пожељно је размислити о куповини новог трансформатора.

VI. ИЛУСТРАЦИЈА МОГУЋНОСТИ ПРИМЈЕНЕ У ПРАКСИ

У овом дијелу илустроваће се могућност примјене предложеног контролера на примјерима кварова мањег и већег обима на трансформаторима.

A. Кварови мањег обима

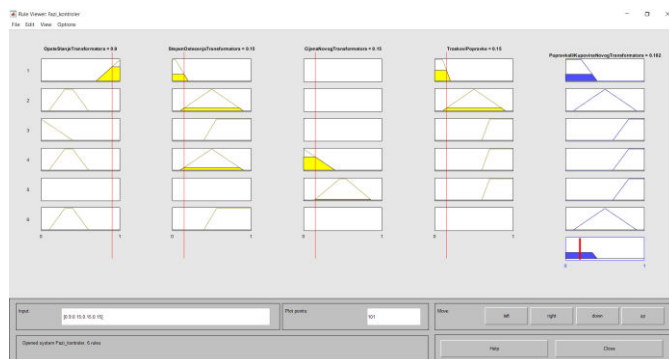
Ако је квар на трансформатору узрокован оштећењем само једног високонапонског намотаја, при чему су остали активни дијелови трансформатора у добром стању, на основу експертског знања закључујемо да је исплативије поправити постојећи трансформатор него куповати нови.

За кварове који захтијевају израду једног високонапонског намотаја, процес поправке трансформатора подразумијева његову допрему у радионицу сервисера, демонтажу, снимање намотаја, набавку жице, израду и монтажу новог намотаја, сушење активног дијела, филтрирање и обраду трансформаторског уља, монтажу и испитивање трансформатора што је процес који се може извести за неколико дана. Трошкови поправке трансформатора у овом случају су сигурно неколико пута мањи од трошкова набавке новог трансформатора.

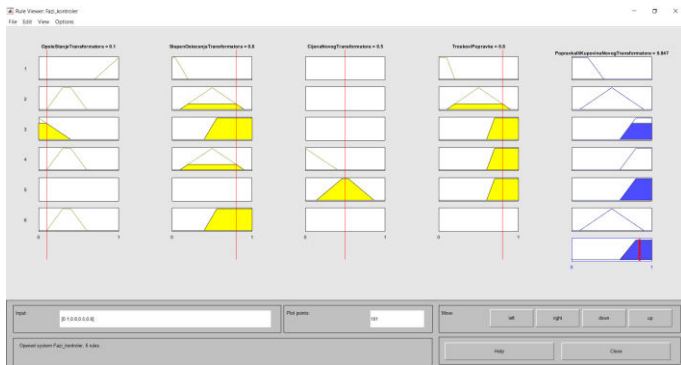
Резултати рада предложеног логичког контролера за случај кварова мањег обима су дати на слици 1. За дати примјер су коришћене сљедеће вриједности улазних параметара:

- опште стање трансформатора износи 0,9 што одговара функцији припадности *одлично*,
- степен оштећења трансформатора износи 0,15 што одговара функцији припадности *мали*,
- цијена новог трансформатора износи 0,15 што одговара функцији припадности *јефтин* и
- трошкови поправке износе 0,15 што одговара функцији припадности *ниски*.

У случају оштећења мањег обима (нпр. један високонапонски намотај), дискретна вриједност излаза контролера износи 0,182 која одговара функцији припадности *поправити*, што подржава претпоставку да је трансформатор исплативо поправити.



Слика 1. Излаз контролера при квару мањег обима трансформатора



Слика 2. Излаз контролера при квару већег обима трансформатора

V. Оштећење већег обима

У случају да је квар трансформатора много већег обима (нпр. уз високонапонске намотаје оштећени су и нисконапонски намотај као и магнетно језгро и трансформаторско уље), на основу експертског знања закључујемо да се набавка новог трансформатора, без обзира на његову цијену намеће као императив.

Резултати рада предложеног логичког контролера за случај кварова већег обима су дати на слици 2. За дати примјер су коришћене следеће вриједности улазних параметара:

- опште стање трансформатора износи 0,1 што одговара функцији припадности *лоше*,
- степен оштећења трансформатора износи 0,8 што одговара функцији припадности *велики*,
- цијена новог трансформатора износи 0,5 што одговара функцији припадности *просјечан* и
- трошкови поправке износе 0,8 што одговара функцији припадности *високи*.

У случају оштећења великог обима (оштећења високонапонских и нисконапонских намотаја, магнетног језгра, трансформаторског уља, трансформаторског суда), дискретна вриједност излаза контролера износи 0,847 која одговара функцији припадности *купити нов*, што подржава претпоставку да је пожељно купити нов трансформатор.

VII. ЗАКЉУЧАК

Предложени аутоматизовани поступак за процјену исплативости ремонта енергетских трансформатора представља само помоћно средство за доношење одлуке при доношењу одлуке о поправци или куповини новог трансформатора.

Добијени излази предложеног система приказују одговарајуће вриједности, зависно од односа улазних величина. Приказани модел развијен је коришћењем

уобичајених поступака пројектовања *fuzzy* контролера уз коришћење искуственог знања. Може се рећи да као такав на свом излазу даје оне вриједности који се слажу са почетним претпоставкама.

Fuzzy приступ у изради контролера за доношење одлуке о поправци или набавци новог трансформатора омогућава једноставну измјену улазних података, јер *fuzzy* подскупови лако могу бити промијењени и конфигурисани, односно прилагођени различитим ситуацијама и условима. Додатна предност овог приступа је флексибилност, што значи да се правила моделованог *fuzzy* логичког контролера лако могу проширити или редуковати (нпр. уважавање утицаја временских рокова набавке или поправке, трајање прекида напајања итд).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ђорђе Калић, Радован Радосављевић, Трансформатори, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 2001.,
- [2] Срђан Јокић, Процјена стања регулационе склопке енергетског трансформатора методом мјерења динамичке отпорности, Универзитет у Источном Сарајеву, Електротехнички факултет, 2022.,
- [3] Раденко Волф, Испитивање електричних стројева, Свеучилиште у Загребу, Загреб, 1960.
- [4] Петар Матић, Електричне машине 1, Електротехнички факултет Бања Лука и Академска мисао Београд, Београд, 2016.
- [5] Душан Лазаревић, Дипломски рад - Модел фази логичког контролера саобраћајне сигнализације, Универзитет у Новом Саду, Технички факултет „Михајло Пупин“, Зрењанин, 2014.
- [6] Перо Субашић, Фази логика и неуронске мреже, Техничка књига Београд, Београд, 1997.

ABSTRACT

A procedure for assessing the cost-effectiveness of repairing distribution power transformers based on the application of *fuzzy* logic has been proposed in the paper. The faults that most commonly occur in practice and the procedures applied during repairs have been analyzed. Their classification has been provided, and corresponding weight coefficients have been defined. Based on the developed model, a *fuzzy* logic algorithm has been formulated to assess the cost-effectiveness of repairs, specifically the need to replace a faulty transformer with a new one. The presented algorithm can serve as the initial step in deciding on upcoming procedures for repairing faulty transformers and is illustrated with several typical examples from practice.

ASSESSING THE COST-EFFECTIVENESS OF REPAIRING DISTRIBUTION POWER TRANSFORMERS USING FUZZY LOGIC

Nemanja Pandžić, Petar Matić