

Анализа рада диференцијалне заштите трансформатора при појави засићења струјних мерних трансформатора - софтверске симулације и испитивања

Никола Сучевић¹, Саша Глигоров¹, Зоран Стојановић²

¹ Универзитет у Београду, Електротехнички институт „Никола Тесла“, Косте Главинића 8а, 11000 Београд, Србија

² Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Булевар краља Александра 73, 11000 Београд, Србија

nikola.sucevic@ieent.org

Кратак садржај: У овом раду анализиран је утицај појаве засићења струјних трансформатора, услед струја кварова великих вредности у систему, на таласни облик струје на секундару струјних трансформатора, као и анализа рада диференцијалне заштите трансформатора у таквим условима. Анализе су вршене на софтверском моделу заштитног уређаја, а потом и на стварном уређају инјектирањем одговарајућих сигнала на његове улазе, применом испитног кофера за испитивање заштитних уређаја. Потом је извршена компарација одзива софтверског модела и стварног уређаја. Моделовање мреже и анализе вршене су у софтверском пакету DigSILENT PowerFactory, а испитивања заштитног уређаја су вршена помоћу DOBLE испитног кофера.

Кључне речи: засићење струјних мерних трансформатора за заштиту, диференцијална заштита трансформатора, софтверске симулације, испитивање заштитних уређаја

1. Увод

У фокусу овог рада налази се утицај појаве засићења струјних трансформатора, услед струја кварова великих вредности у систему, на таласни облик струје на секундару струјних трансформатора за заштиту, као и анализа рада заштитних уређаја у таквим условима.

У раду је анализирано да ли при појави кратких спојева у мрежи долази до засићења струјних трансформатора, уважавајући карактеристике самих струјних трансформатора и њихових секундарних оптерећења, као параметре једне реалне електроенергетске мреже.

Потом је проверавано на који начин се заштитни уређај понаша при појави изобличеног сигнала на својим струјним улазима. Анализе су вршене прво на софтверском моделу заштитног уређаја, а потом и на стварном уређају инјектирањем одговарајућих сигнала на његове улазе, применом испитног кофера за испитивање заштитних уређаја. На крају је извршена компарација одзива софтверског модела и стварног уређаја.

Подаци о елементима одговарају једној реалној мрежи, где је анализиран рад диференцијалне заштите трансформатора сопствене потрошње хидроелектране.

Модел мреже садржи податке о еквивалентним електроенергетског система, далеководу, генераторима и блок-трансформатору, као и о трансформатору сопствене потрошње и еквиваленте сопствене потрошње једне хидроелектране.

У модел су унети релевантни параметри струјних трансформатора и заштитних уређаја, укључујући и подешавања заштитних функција.

2. Теоријске основе

Симулација таласног облика струје на секундарима струјних трансформатора (СТ) узимајући у обзир ефекте појаве засићења за крајњи циљ има то да послужи као основа за процену исправног рада система релејне заштите [1].

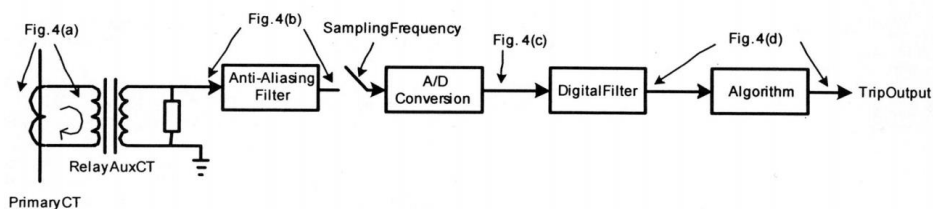
Циљ симулација није само у томе да се одреди да ли долази до засићења СТ-а, него да се на основу карактеристике електроенергетског система и насталог поремећаја, карактеристике самог СТ-а и оптерећења на његовом секундару, одреди таласни облик струје на секундару, што представља улазну величину коју мери заштитни уређај. Затим се на основу логике рада и алгоритама самог заштитног уређаја проверава да ли посматрани уређај реагује у складу са подешавањима за задати поремећа у систему, уважавајући таласни облик струје на секундару СТ-а (тзв. „*waveform approach*“) [2].

Како би се проценио одзив целокупног система заштите потребно је одредити:

1. таласни облик примарне струје квара,
2. таласни облик струје квара добијене на излазу из секундара СТ-а,
3. на који начин заштитни уређај обрађује добијени сигнал на свом струјном улазу,
4. на који начин се реле одазива на добијени улазни сигнал,

5. да ли долази до одговарајуће или погрешне прораде при анализираном поремећају и да ли долази до појаве додатног временског кашњења у одзиву заштитног уређаја.

Како би се одредио одзив система заштите са струјним трансформатором и микропроцесорским уређајем потребно је познавати основне компоненте овог система, које поједностављено могу бити описане елементима приказаним на слици 1.



Слика 1: Поједностављен модел микропроцесорског релеја [1]

Елементи приказани на слици 1 су:

- струјни мерни трансформатор (*Primary CT*): служи да преслика примарну струју у систему и доводе је на помоћни струјни трансформатор релеја,
- улазни претварач релеја (*Relay AuxCT*): претвара улазни струјни сигнал у скалирану напонску величину коју реле обрађује,
- *Anti-Aliasing Filter*: из добијеног сигнала елиминише компоненте високе учестаности,
- аналогно дигитални претварач (*A/D Conversion*): аналогни сигнал претвара у дигитални,
- дигитални филтер (*Digital Filter*): врши обраду сигнала и израчунава основну компоненту и хармонике,
- алгоритам (*Algorithm*): на основу прорачунатих компоненти и поређења са подешеним вредностима за прораду, одлучује да ли долази до прораде заштитне функције,
- излазни сигнал уређаја (*TripOutput*): одговара одлуци заштитне функције да ли је потребно проследити сигнал за искључење на одговарајуће прекидаче.

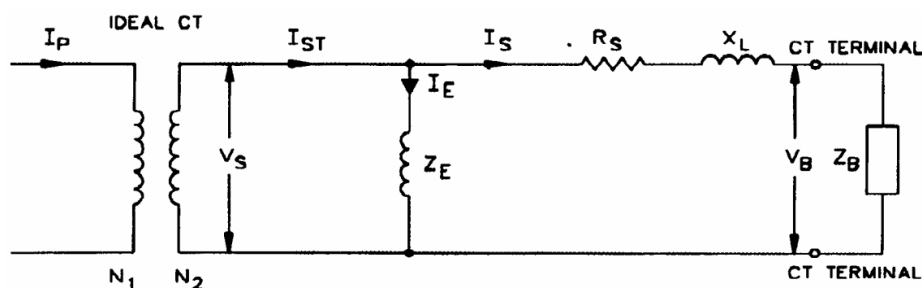
Детаљније објашњење утицаја сваког од наведених елемената на прорачунавање потребних величина за рад заштитног уређаја може се наћи у [2] и [3].

Моделовање свих компоненти заштитних уређаја углавном није у потпуности могуће најчешће због недоступности података о свим имплементираним алгоритмима које користе произвођачи заштитних уређаја, као што је сугерисано у [4].

Такође, коришћење различитих софтверских модела струјних трансформатора резултује и различитим понашањем заштитних уређаја у истим условима рада [5].

У пракси, за специфицирање карактеристика струјних трансформатора користе се различити међународни стандарди [6], **Error! Reference source not found.**, [8] и [9].

Поједностављена заменска шема струјног трансформатора приказана је на слици 2.



Слика 2: Поједностављен модел струјног трансформатора [9]

где су:

I_P – струја кроз примарни намотај,

N_2/N_1 – преносни однос,

V_S – индукована електромоторна сила секундара,

I_{ST} – сведена вредност струје примарног намотаја,

I_E – струја грешке,

Z_E – импеданса магнећења,

I_S – секундарна струја,

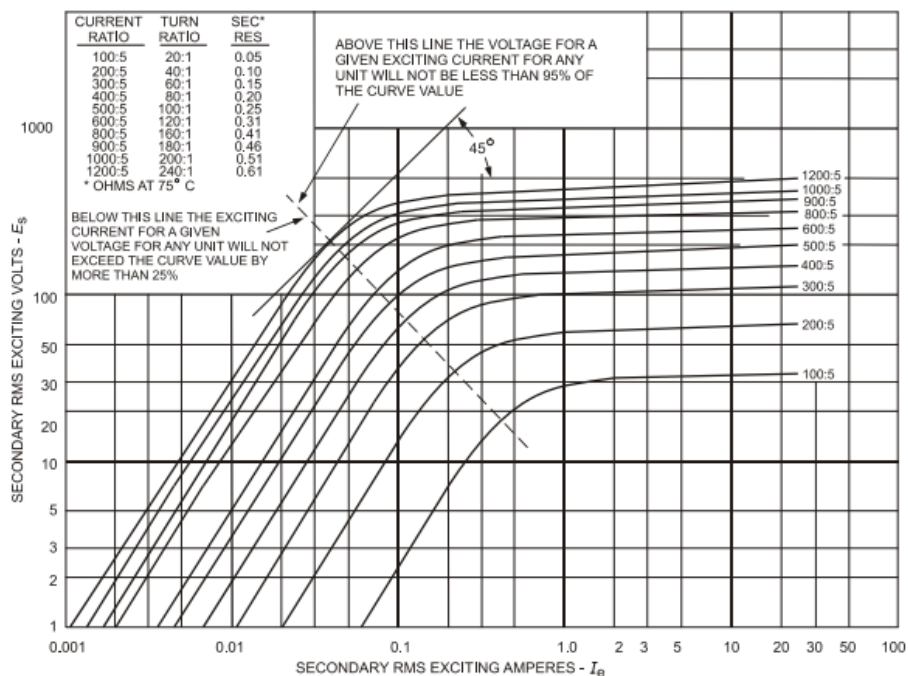
R_S – отпорност секундарног намотаја,

X_L – реактанса расипања секундарног намотаја (најчешће се занемарује),

V_B – напон на прикључцима секундара,

Z_B – импеданса оптерећења.

Када је индукована електромоторна сила (ЕМС) у секундарном колу СТ-а мале вредности, и струја кроз грану магнећења је мале вредности, а таласни облик струје кроз грану са оптерећењем је синусиодалан, изобличење таласног облика је мало и трансформатор ради у линеарном делу карактеристике. Како се вредност ЕМС у секундарном колу повећава, било услед пораста струје примарног намотаја или услед повећања секундарног оптерећења СТ-а, вредност флуksа у магнетном колу такође расте. Пораст вредности флуksа доводи до појаве пораста вредности струја магнећења, односно рада СТ у области засићења магнетског кола. Рад у овој области карактерисан је великом вредношћу струје грешке и значајним изобличењем таласног облика секундарне струје, која се доводи на улаз у заштитни уређај. Карактеристике магнећења СТ-а илустроване су на слици 3.



Слика 3: Карактеристике магнећења струјних трансформатора [6]

На слици је приказан однос вредности струје гране магнећења и напона на грани магнећења (I_E и V_S). На слици се види да у области мањих вредности напона на грани магнећења (леви део карактеристике), пораст напона не узрокује велики пораст вредности струје магнећења, док у области рада са великим вредностима напона на грани магнећења, чак и мали пораст напона узрокује релативно велики пораст вредности струје кроз грану магнећења.

Важан параметар који је потребно одредити за симулацију таласног облика струје на секундару СТ-а, јесте напон при коме струјни трансформатор улази у област засићења. Важно је напоменути да постоји неколико врста дефинисања овог напона.

У [9] овај параметар се назива напон колена карактеристике магнећења. За СТ без ваздушног зазора ова величина се дефинише као „тачка максималне пермеабилности на карактеристици, где на логаритамском дијаграму, тангента на криву има нагиб од 45°“ (А дефиниција [8]). У [6] се вредност овог напона дефинише као: „минимална вредност синусоидалног напона основне фреквенције, доведеног на секундарне прикључке, са свим осталим намотајима отвореним, која при повећању ефективне вредности за 10% проузрокује пораст ефективне вредности струје магнећења за не више од 50%“ (Б дефиниција). Такође се напомиње да се коришћењем дефиниције Б за

вредност напона колена карактеристике добију вредности 20-25% веће него када се користи дефиниција А [9].

У пракси се користе и друге дефиниције. Неки произвођачи овај напон дефинишу као напон где магнетна индукција достиже вредност засићења од око 1,5 Т (зависи од класе СТ-а и примењених магнетних материјала [10]).

Тешкоћа са егзактним моделовањем струјних трансформатора (као и већине других инжењерских прорачуна где се захтева прецизно моделовање било којих елемената) јесте доступност свих потребних параметара. У конкретном случају код моделовања струјних трансформатора, на таласни облик струје у секундарном колу када се трансформатор налази у радном режиму значајно испод напона колена карактеристике магнећења утичу ефекти: магнећења, хистерезиса и вихорних струја, чије моделовање захтева параметре који најчешће нису доступни. Међутим, показује се да када се струјни трансформатор нађе у режиму рада изнад колена карактеристике магнећења, претходно наведени ефекти, осим ефекта магнећења, немају значајан утицај на укупну струју на секундарном прикључку, односно струју коју заштитни уређај мери као улазну величину. Ово значајно поједностављује бројне анализе у којима је потребно одредити адекватан облик струје на секундарима струјних трансформатора при великим струјама квара када је потребно проверити одзив система релејне заштите [11].

Снимање карактеристика струјних трансформатора се најчешће изводи тако да се карактеристика снима у областима релативно малих струја кроз секундарни намотај СТ-а (при чему се коло са оптерећењем отвори), до одређивања напона колена и нешто изнад тих вредности. На основу ових снимања, лако се одређује струја грешке у области када СТ ради у режимима које не карактерише засићење магнетског кола. Карактеристика се најчешће не снима у области високих засићења, тако да проблем може да представља моделовање понашања струјног трансформатора у овим режимима.

У даљим анализама, величина која је од интереса јесте напон засићења струјног трансформатора. Овај напон није исто што и напон колена карактеристике магнећења. Наиме, напон колена, дефинисан у претходном делу текста, представља тачку где сам струјни трансформатор почиње да се понаша нелинеарно, док напон засићења представља тачку након које струјни трансформатор ради у области засићења [12].

Напон засићења струјног трансформатора дефинише се као напон на грани магнећења при струји кроз грану магнећења која одговара називној струји грешке ([9], [11] и [13]) назначено оптерећеног струјног трансформатора, кроз који протиче назначена струја секундара помножена назначеним прекострујним бројем, односно:

$$U_{sat} = n \cdot I_{N,S} \cdot (R_{ST} + R_{b,nom}) \quad (1)$$

$$I_{sat} = X \cdot I_{N,S} \cdot n \quad (2)$$

где је:

U_{sat} – напон засићења,

n – номинални прекострујни број,

$I_{N,S}$ – номинална секундарна струја,

R_{ST} – отпорност секундарног намотаја СТ-а,

$R_{b,nom}$ – назначено оптерећење СТ-а,

I_{sat} – називна струја грешке,

X – номинална грешка.

На пример. код струјног трансформатора 10P20 (где је номинална грешка $X=10$, номинални прекострујни број $n=20$) називне струје секундара од $I_{N,S}=1$ А, називна струја грешке износи $(X/100) \cdot I_{N,S} \cdot n = 10/100 \cdot 20 \cdot 1 = 2$ А. Ако је примењени трансформатор 5P10 (где је номинална грешка $X=5$, номинални прекострујни број $n=10$), $I_{N,S}=5$ А, ова струја износи $(X/100) \cdot I_{N,S} \cdot n = 5/100 \cdot 10 \cdot 5 = 2,5$ А.

За постизање што боље тачности симулације таласног облика секундарне струје, вредност напона засићења је потребно измерити, снимањем карактеристике трансформатора.

3. Софтверски модел система

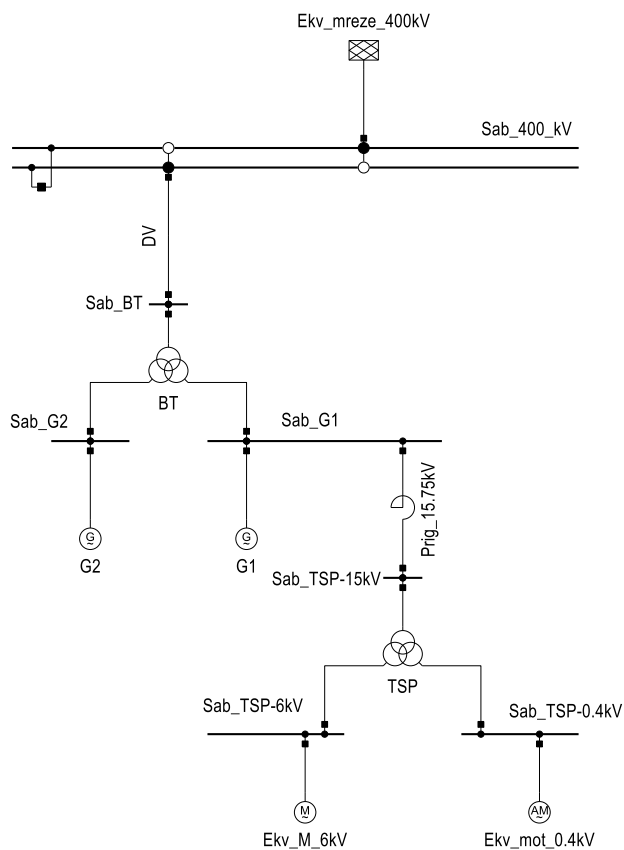
3.1. Модел електроенергетске мреже

Моделовање целокупног система извршено је у софтверском пакету *DlgSILENT PowerFactory* [14].

Анализирана мрежа представља мрежу једног електроенергетског производног постројења прикљученог на високонапонску мрежу. Производно постројење се састоји од два хидрогенератора (ХГ), блок-трансформатора (БТ) који је преко далековода (ДВ) повезан на преносну мрежу, трансформатора сопствене потрошње (ТСП), и еквивалентна сопствене потрошње.

На 400 kV преносну мрежу преко далековода и тронамотајног блок-трансформатора 420/15,75/15,75 kV/kV/kV повезана су два хидрогенератора, сваки на један секундар. На 15,75 kV сабирницама једног генератора постоји отцеп трансформатора 15,75/6,3/0,4 kV/kV/kV за напајање сопствене потрошње блока, испред кога се налази пригушница за ограничавање струја кратког споја.

Једнополна шема анализираних мреже приказана је на слици 4.



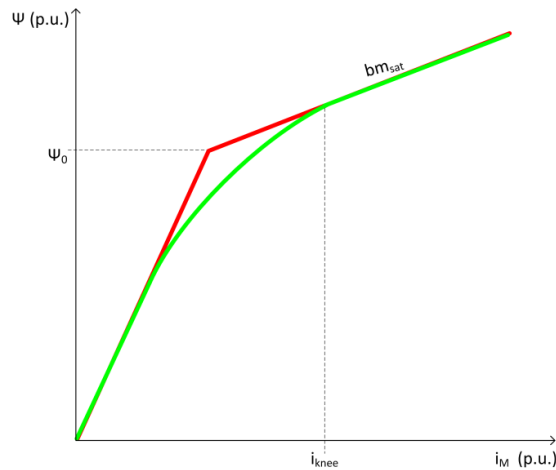
Слика 4: Модел анализиране мреже

3.2. Модели струјних трансформатора

DigSILENT PowerFactory омогућава више начина моделовања струјних трансформатора [15].

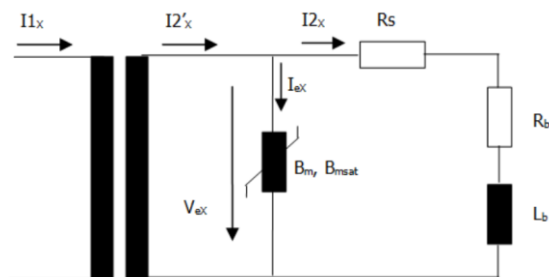
За једноставније анализе рада система заштите, струјни трансформатори се могу моделовати као идеални трансформатори, у потпуности описани преносним односом, док се за нешто комплексније анализе може се уважити устаљена грешка мерења трансформатора, не уважавајући ефекте засићења.

За комплексне анализе, софтвер омогућава да се струјни трансформатор моделује уз уважавање засићења, са део-по-део линеарном или карактеристиком која је описана сложеном функцијом. У оба модела, када се струјни трансформатор нађе у области рада у засићеном делу карактеристике, СТ се понаша као линеарна функција. Ово је илустровано на слици 5.



Слика 5: Карактеристика струјног трансформатора са уважавањем засићења [16]

Заменска шема модела СТ приказана је на слици 6.



Слика 6: Заменска шема модела струјног трансформатора са уважавањем карактеристике засићења [15]

Ознаке на слици 6 имају следећа значења:

I_{1x} – струја кроз примарни намотај,

$I_{2'x}$ – сведена вредност струје примарног намотаја,

I_{2x} – секундарна струја,

I_{Ex} – струја грешке,

V_{ex} – индукована електромоторна сила секундара,

B_m – сусцептанса гране магнећења, незасићена вредност,

B_{msat} – сусцептанса гране магнећења, засићена вредност

R_S – отпорност секундарног намотаја,

R_B – отпорност оптерећења,

X_B – реактанса оптерећења.

Суспективност гране магнећења (незасићена вредност) гране магнећења описана је са:

$$B_m = \frac{1}{\omega \cdot L_m} = \frac{I_0 / I_{N,s}}{Z_{B,nom}} \quad (3)$$

где су L_m индуктивност гране магнећења (незасићена вредност), I_0 струја грешке при назначеној струји секундара струјног трансформатора $I_{N,s}$, док је $Z_{B,nom}$ импеданса називног оптерећења.

Засићена вредност суспектансе гране магнећења је:

$$B_{m,sat} = \frac{1}{\omega \cdot L_{m,sat}} = \frac{I_{sat}}{U_{sat}} \quad (4)$$

где су L_m индуктивност гране магнећења (засићена вредност), I_{sat} и U_{sat} струја и напон засићења, дефинисани у поглављу 2.

Промена флукса прорачунава се као:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \omega_N \cdot V_{ex} \quad (5)$$

при чему је напон на грани магнећења једнак:

$$V_{ex} = (R_s + R_b) \cdot I_{2x} + L_b \cdot \frac{dI_{2x}}{dt} \approx (R_s + R_b) \cdot I_{2x} \quad (6)$$

$$I_{2x} = \frac{I_{1x}}{n} - I_{ex} \quad (7)$$

У овом раду користиће модел струјног трансформатора са карактеристиком магнећења описаном полиномијалном функцијом.

Струја кроз грану магнећења, у незасићеном делу карактеристике струјног трансформатора описана је са:

$$I_{ex} = \frac{B_m}{\omega_N} \cdot \Psi \cdot \left(1 + \left| \left(\frac{\Psi}{\Psi_0} \right)^{k_{sat}} \right| \right) \quad (8)$$

При чему је Ψ_0 помоћна променљива прорачуната тако да полиномијална функција у тачки засићења достиже вредност флукса засићења:

$$\Psi_0 = \Psi_{knee} \cdot e^{\frac{-\ln\left(\frac{B_{m,sat}}{B_m} \cdot \frac{k_{sat} + 1}{k_{sat}}\right)}{k_{sat}}} \quad (9)$$

при чему је:

$$\Psi_{knee} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{k_{sat} + 1}{k_{sat}} \right) \cdot U_{sat} \quad (10)$$

где је:

U_{sat} - је напон засићења.

У засићеном делу, струја грешке износи:

$$I_{ex} = I_{knee} + \frac{B_{m,sat}}{\omega_n} \cdot (\Psi - \Psi_{knee}) \quad (11)$$

где је:

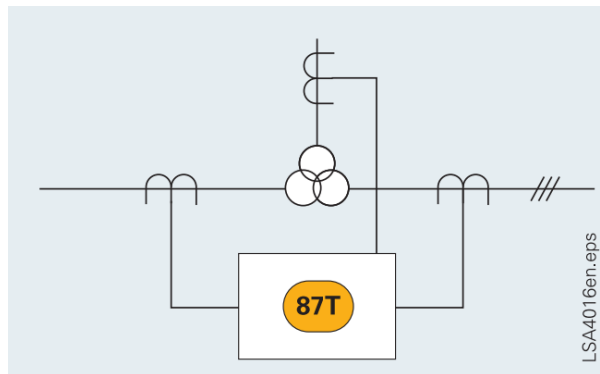
$$I_{knee} = \frac{B_m}{\omega_N} \cdot \Psi_{knee} \cdot \left(1 + \left| \left(\frac{\Psi_{knee}}{\Psi_0} \right)^{k_{sat}} \right| \right) \quad (12)$$

Суштински, софтверски модел појаву засићења магнетског кола струјног трансформатора моделује нелинеарном импедансом која мења вредност у зависности од радне тачке.

3.3. Модел система заштите

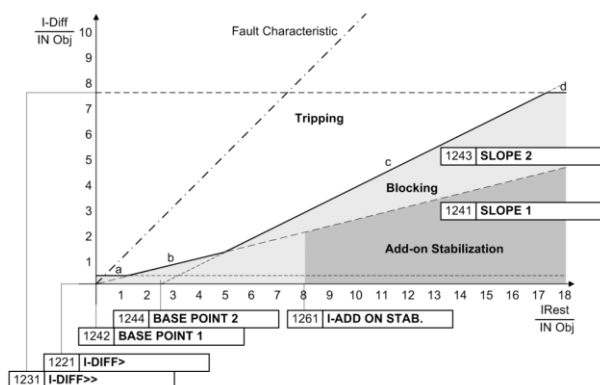
Заштита је реализована применом микропроцесорског заштитног уређаја *Siemens 7UT63* са имплементираним диференцијалном заштитном функцијом, као основном заштитом од међуфазних кратких спојева у трансформатору.

Заштитни уређај информације о струјама узима са три струјна трансформатора по једним на свакој страни штићеног ТСП-а, што је илустровано на слици 7.



Слика 7: Принцип рада диференцијалне заштите [17]

Функција реагује према карактеристици приказаној на слици 8.

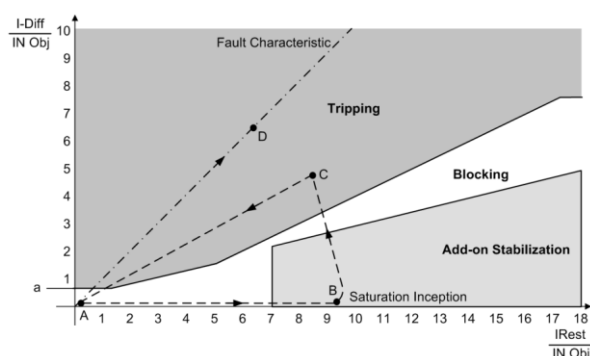


Слика 8: Радна карактеристика диференцијалне заштите [18]

Праг прораде диференцијалне заштите (полуправа означена словом а на слици 8), се подешава на вредност $(0,1-0,2) \cdot I_{n,obj}$ (где је $I_{n,obj}$ - номинална струја штићеног објекта, параметар који се подешава у заштитном уређају) због могућих разлика у карактеристикама струјних мерних трансформатора које могу да унесу разлике у мереним струјама и у нормалном раду трансформатора. Услед електрично блиских спољашњих кварова који могу да проузрокују велике струје кроз струјне трансформаторе, због разлике у карактеристикама струјних мерних трансформатора који се користе за диференцијалну заштиту, може доћи до појаве лажне диференцијалне струје што може да узрокује погрешну прораду ове заштите. Како би се ово спречило, у логику рада функције уводи се величина стабилизациона струја $I_{stab} = |I_1| + |I_2|$ (полуправе означене словима b и c на слици 8). Уколико се појави диференцијална струја $I_{diff} = |I_1 + I_2|$ већа од подешене вредности (полуправа означена словом d на слици 8), долази до прораде диференцијалне заштите, без обзира на прорачунату стабилизациону струју. Обезбеђена је и додатна стабилизација при појави једносмерне компоненте услед различитих временских константи секундарних кола. Стабилизација диференцијалне заштите остварена је и блокадом при детекцији појаве виших хармоника (другог и петог) који се најчешће јављају при укључењу трансформатора и рада трансформатора са повишеним напоном.

У оквиру заштитне функције постоји и стабилизација која на основу трајекторије поремећаја врши процену да ли је дошло до засићења струјних трансформатора при спољашњим кваровима и по потреби блокира прораду заштите. Наиме, при појави спољашњих кварова (кварове ван зоне штићења диференцијалне заштите) са великим струјама квара, може доћи појаве засићења струјних трансформатора и јављања релативно велике диференцијалне струје, поготово ако су карактеристике струјних трансформатора различите, као и степени засићења који се јаве. Ово може довести до преласка тачке која одговара прорачунатим величинама диференцијалне и стабилизационе струје у зону прораде заштите. Заштитни уређај *Siemens 7UT6x* у логици

рада има имплементирану додатну стабилизацију којом се овакво стање детектује и блокира прорада заштите. Ова стабилизација прати динамику промене трајекторије диференцијалне и стабилизационе струје, што је илустровано на слици 9.



Слика 9: Стабилизација диференцијалне заштите при екстерним кваровима [18]

По настанку спољашњег квара (тачка означена словом *A*), долази до наглог пораста мерених струја, што доводи до пораста стабилизационе струје уз занемарљив пораст диференцијалне струје. По појави засићења струјних трансформатора (тачка означена словом *B*), долази до пораста диференцијалне и благог смањења стабилизационе струје, што може довести до преласка радне тачке у област прораде заштите (тачка означена словом *C*). Насупрот томе, при појави квара унутар зоне штићења диференцијалне заштите, радна тачка се креће дуж полуправе која полази из координатног почетка, ка тачки означеној словом *D*, јер стабилизациона и диференцијална струја приближно уједначено расту. Детекција појаве засићења се заснива на томе да се приликом појаве спољашњег квара најпре јавља стабилизациона струја велике вредности која помера радну тачку у област детекције засићења готово тренутно и одлука о детекцији појаве засићења се доноси у оквиру прве четвртине периоде. Уколико је детектовано да је у питању спољашњи квар, диференцијална заштита је блокирана за изабрани временски интервал. Додатно, уколико је радна тачка стационарна дуже од једне периоде и налази се у околини карактеристике за унутрашње кварове, блокада се укида, што омогућава детекцију унутрашњих кварова који се јаве након спољашњих кварова који изазивају засићење струјних трансформатора. Функција је реализована тако да ради у свакој фази независно, а стабилизација може да блокира рад заштите у све три фазе или у фази у којој је детектована појава засићења струјних трансформатора.

Логичка шема функције диференцијалне заштите и детаљан опис алгоритма рада дат је у [18].

У софтверском моделу, заштитни уређај је моделован тако да максимално одговара моделу стварног заштитног уређаја [19]. Према

[19], у софтверском моделу диференцијалне заштите имплементирана је логика рада стварног заштитног уређаја, сем блокаде по трећем хармонику, независног временског одлагања нестабилисаног члана, ("cross-block" функција). Оно што је за анализе које су предмет овог рада најважније, у софтверском моделу заштитне функције није имплементирана функције блокаде при детекцији засићења струјних трансформатора.

4. Софтверске симулације и испитивање реалног заштитног уређаја

Како би се проверио рад система заштите, односно правилан рад функције диференцијалне заштите ТСП-а, симулиран је квар на 6,3 kV страни ТСП-а, ван зоне штићења диференцијалне заштите.

Софтверским симулацијама струја кратких спојева у анализираном систему уважава се промена интензитета струје у времену, при чему су у обзир узете све релевантне импедансе и временске константе елемената мреже. Струја кратког споја на месту квара опада са временом, при чему су уважене промене како једносмерне компоненте струје квара, тако и промене наизменичне компоненте струје квара.

Утврђено је да су за предметну анализу најинтересантији случајеви трополних кратких спојева на 6,3 kV страни ТСП-а ван зоне штићења диференцијалне заштите. У овом случају највећи део укупне струје квара пролази кроз стари струјни трансформатор на 6,3 kV страни. Резултати симулација показују да долази до појаве значајног изобличења таласног облика струје на секундару, услед засићења струјних трансформатора.

Испитивање одзива стварног заштитног уређаја извршено је његовим побуђивањем струјним сигнаlima доведеним из испитног кофера Doble F6150 [20]. При тестирању одзива, на струјне улазе заштитног уређаја доведени су таласни облици струја добијени симулацијама у софтверско моделу система. Софтвер *DigSILENT PowerFactory* омогућава извоз жељених величина, односно у конкретном случају таласног облика струје у *COMTRADE* формат, који се затим користи као улазна величина за испитни кофер. При испитивању коришћен је софтвер TransWin [21], који омогућава генерисање задатих таласних облика који се доводе на релејне улазе, преко одговарајућих излазних сигнала испитног кофера. На слици 10 приказана је поставка за испитивање одзива заштитног уређаја.

По испитивању заштитног уређаја, извршено је ишчитавање и извоз записа поремећеја из софтвера заштитног уређаја (коришћењем алата DIGSI 4 [22]). Потом су одговарајући записи из заштитног уређаја увезени у софтвер *DigSILENT PowerFactory*, како би се извршило поређење релевантних сигнала софтверског модела заштитног уређаја и стварног заштитног уређаја.



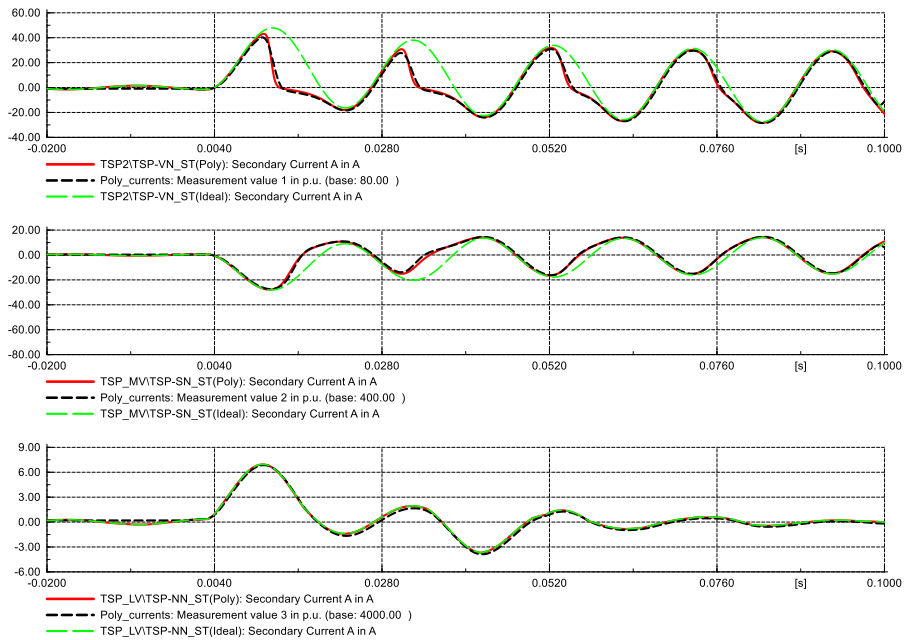
Слика 10: Поставка за испитивање заштитног уређаја

4.1. Трополни кратак спој на 6,3 kV страни ТСП-а

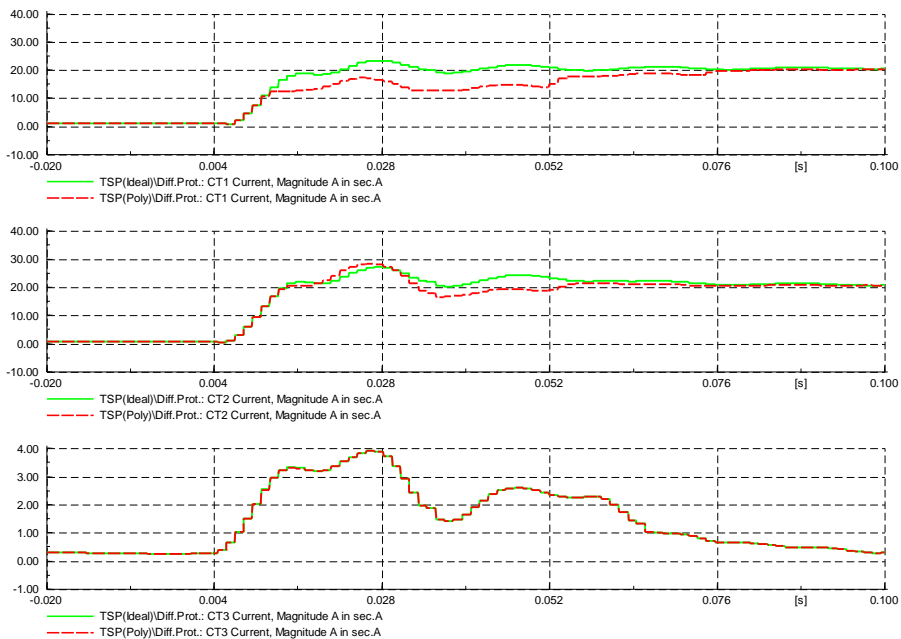
Случај који је интересантан за предметну анализу јесте квар на 6,3 kV сабирницама ТСП-а, ван зоне штићења диференцијалне заштите.

Уколико се уваже карактеристике засићења струјних трансформатора, долази до појаве изобличења таласног облика струја на секундарима СТ, које се доводе на улазе заштитног уређаја. Ово је приказано на слици 11. На слици је зеленом бојом приказан таласни облик струје добијен симулацијом уколико је струјни трансформатор идеалан, а црвеном бојом је приказан таласни облик струје на секундару добијен симулацијом у случају уважавања карактеристике засићења, док црна линија приказује струјни сигнал увезен из записа тестираног релеја. Горњи график представља струје на 15,75 kV страни, средњи график представља струје на 6,3 kV страни, док доњи график представља струје на 0,4 kV страни. Према приказаном, засићење струјног трансформатора највише је изражено на 15,75 kV страни, нешто мање на 6,3 kV страни, а струјни трансформатор на 0,4 kV страни не улази у засићење.

Изобличење таласног облика струје има за последицу то да је прорачуната ефективна вредност струје (црвена линија) мања у поређењу са случајем када је таласни облик струје неизобличен (зелена линија), што је приказано на слици 12. Горњи график представља прорачуната ефективна вредност струје на 15,75 kV страни, средњи график представља прорачуната ефективна вредност струје на 6,3 kV страни, док доњи график представља прорачуната ефективна вредност струје на 0,4 kV страни.

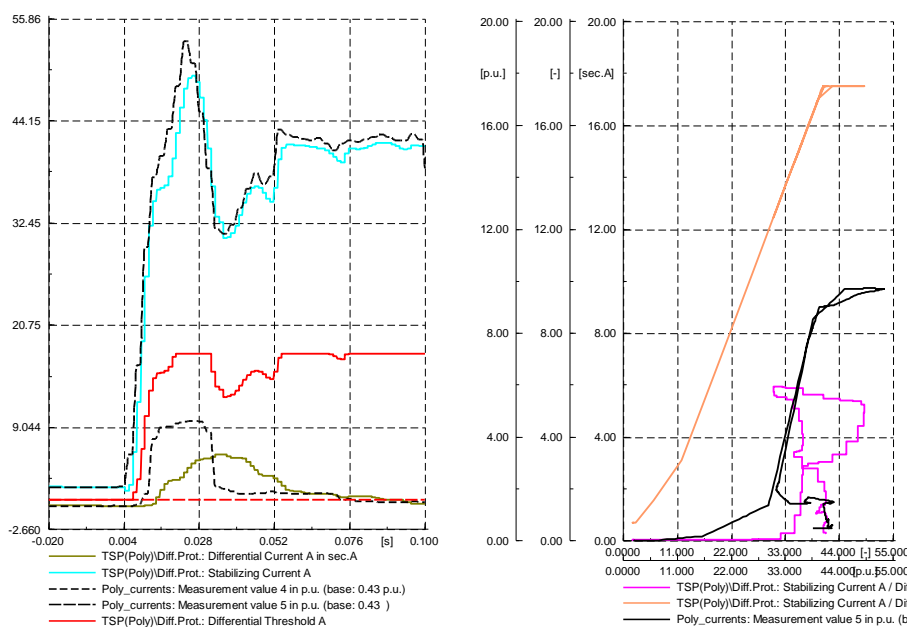


Слика 11: Таласни облици струје на секундарима



Слика 12: Прорачунате ефективне вредности струја на секундарима

Према наведеном, услед чињенице да је због изобличења таласног облика струје на различитим странама ТСП-а (тј. на различитим струјним трансформаторима) сума струја коју мери заштитни уређај различита од нуле, у сваком временском тренутку, иако је квар ван зоне штићења диференцијалне заштите, може доћи до погрешне прораде заштитне функције. Како би се проверио исправан рад заштитне функције у овим условима, потребно је анализирати промену прорачунате диференцијалне и стабилизационе струје, као и промену трајекторије радне тачке у равни диференцијалне и стабилизационе струје. Такође, потребно је упоредити одзив софтверског модела заштитног уређаја и записа из тестираног уређаја. Ово је илустровано на слици 13.

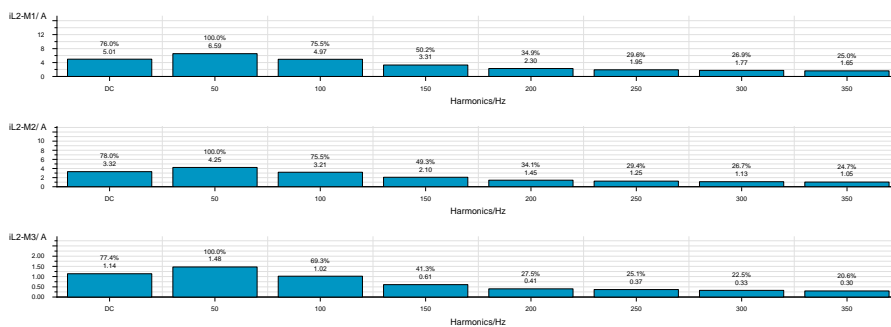


Слика 13: Прорачунате вредности диференцијалне и стабилизационе струје – софтверски модел релеја и запис из уређаја

Леви график на слици 13 приказује промене (у времену) прорачунате стабилизационе струје (горња црна линија-заштитни уређај, светло плава линија-модел заштитног уређаја), прорачунате диференцијалне струје (доња црна линија-заштитни уређај, светло плава линија-модел заштитног уређаја), као и праг прораде диференцијалне заштите (црвена линија). Десни график приказује трајекторију радне тачке у диференцијално равни. На апсциси је стабилизациона струја, док је на ординати диференцијална струја. Црном бојом је приказана трајекторија радне тачке извезена из записа заштитног уређаја, розе бојом приказана је трајекторија радне тачке из софтверског модела заштитног уређаја, док је наранџастом приказан праг прораде заштитне функције. На основу приказаног, може се закључити да долази до појаве лажне

диференцијалне струје због изобличења таласног облика струје на улазу у заштитни уређај, услед засићења струјних трансформатора. На слици 13 црном бојом су означени сигнали увезени из записа преузетог са заштитног уређаја, побуђеног изобличеним таласним обликом струје (приказано на слици 11). Слика 13 илуструје да постоје разлике у одзиву софтверског модела заштитног уређаја у односу на стварни уређај. Према приказаном, може се уочити да су прорачунате стабилизационе струје софтверског модела заштитног уређаја и реалног уређаја доста добро поклапају (горња црна и светло плава линија на левом графику). С друге стране, прорачунате величине диференцијалне струје софтверског модела заштитног уређаја и стварног уређаја се више разликују (доња црна и зелена линија на левом графику). Ово је последица чињенице да стварни заштитни уређаји за обраду сигнала користе алгоритме чији детаљи нису доступни јавно, па стога нису могли бити имплементирани у софтверском моделу заштитног уређаја. На пример, у упутству произвођача [18], констатује се да у процесу обраде сигнала, алгоритам детектује присуство једносмерне компоненте, која утиче на промену прорадне вредности диференцијалне заштите. Додатно, из одбирака струја, стабилизациона величина се прорачунава према укупној вредности струје, док се за диференцијалну величину прорачунава основна компонента. Међутим, детаљи о реализацији ових функционалности нису доступни, као ни примењени нумерички алгоритми, па нису имплементирани у самом софтверском моделу ове функције.

Ово има значајан утицај на прорачунату диференцијалну струју, с обзиром на висок удео једносмерне компоненте у струји квара. На слици 14 приказан је хармонијски састав струје на различитим странама ТСП-а у тренутку настанка квара. На слици 14 приказани су хармонијски састави струја (DC компонента, основни хармоник, други хармоник, трећи, итд.), за струје на 15,75 kV страни (горњи график), на 6,3 kV страни (средњи график) и на 0,4 kV страни (доњи график).



Слика 14: Хармонијски састав струје квара у тренутку настанка квара - запис из уређаја

Према наведеном, може се закључити да постоје разлике у одзиву софтверског модела и реалног заштитног уређаја, услед чињенице да су у стварном уређају имплементиране одређене функционалности за које детаљи нису доступни, па стога нису имплементиране у софтверском моделу.

У анализираном случају иако постоје разлике између софтверског модела и реалног заштитног уређаја, у оба случаја не долази до погрешне прораде заштитне функције диференцијалне заштите, па се може сматрати да софтверски модел у овом случају на одговарајући начин симулира понашање реалног уређаја.

5. Закључна разматрања

Испитивање понашања система заштите са струјним трансформаторима и заштитним уређајима у лабораторијама са испитним уређајима великих снага је врло непрактична активност која захтева коришћење скупе лабораторијске опреме. С друге стране, егзактно моделовање заштитних уређаја у софтверу најчешће није изводљиво, јер произвођачи заштитних уређаја не дају све потребне податке о свим коришћеним алгоритмима и функцијама. Стога, оптимално решење може да представља комбинација софтверских симулација и испитивања реалних заштитних уређаја.

Софтверске симулације треба да послуже за одређивање примарне струје квара, као и понашање струјних трансформатора у условима великих вредности примарних струја квара уз уважавање појаве засићења, на основу чега се може одредити таласни облик струје на улазу у заштитни уређај.

Овако добијени струјни сигнали могу да се користе као улазне величине при тестирању заштитних уређаја применом испитних кофера. Потом се добијени одзив стварног заштитног уређаја може упоредити са одзивом софтверског модела заштитног уређаја у циљу верификације модела.

Овакав начин евалуације рада система заштите представља софистициран метод за оцену адекватности примене струјних трансформатора са заштитним уређајима, узимајући у обзир карактеристике електроенергетског система где је систем заштите примењен, карактеристике примењених струјних трансформатора и карактеристике самих заштитних уређаја.

Показано је да, иако коришћени модел струјног трансформатора није у потпуности егзактан, може да се користи као основ за процену рада система заштите.

Такође, иако су уочене разлике у функционисању софтверског модела заштитног уређаја у поређењу са радом реалног заштитног уређаја, може се закључити да постојећи модел задовољавајуће

функционише у анализираном случају и даје одговарајући одзив који се поклапа са одзивом стварног уређаја, у анализираном случају.

Даља истраживања могу да се усмере ка томе да се изврши поређење снимљених струја квара у систему (снимци са заштитних уређаја), са таласним облицима струје на секундару струјних трансформатора који се добију софтверским симулацијама, уз уважавање реалног стања у посматраној мрежи у тренутку настанка квара и наравно карактеристика струјних трансформатора. Након тога могу се извршити детаљна поређења одзива реалног заштитног уређаја и софтверског модела уређаја.

Литература

- [1] R.E. Cosse, D.G. Dunn, R.M. Spiewak, „CT Saturation Calculations – Are They Applicacable in the Modern World? – Part I, The Question“, *Petroleum and Chemical Industry Conference, 2005.*
- [2] R.E. Cosse, D.G. Dunn, R.M. Spiewak, Stanley E. Zocholl, Terence Hazel, David T. Rollay, „CT Saturation Calculations – Are They Applicacable in the Modern World? – Part II, Proposed Responsibilities“, *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2007. PCIC '07. IEEE*
- [3] B. Kasztenny, J. Mazereeuw, and H. DoCarmo, "CT Saturation in Industrial Applications – Analysis and Application Guidelines," in *Proc. the 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers, March 27-29, 2007*
- [4] R.E. Cosse, D.G. Dunn, R.M. Spiewak, James E. Bowen , „CT Saturation Calculations – Are They Applicacable in the Modern World? – Part III, Low-Ratio, High-Current CT/Microprocessor Relay Comparisons at a High-Current Testing Laboratory“, *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2008. PCIC 2008. 55th IEEE*
- [5] Peirre Bertrand, Dr. Michael Mendik, Terence Hazel, Pascal Tantin, „CT Saturation Calculations – Are They Applicacable in the Modern World? – Part IV, CT Sizing as per IEC Standards and the Benefits of Non Conventional Instrument transformers“, *Petroleum and Chemical Industry Conference, 2009. PCIC 2009. 2009 Record of Conference Papers - Industry Applications Society 56th Annual*
- [6] *Instrument transformers – Part 1: Current transformers, International Electrotechnical Commission IEC 60044-1,*
- [7] *Instrument transformers – Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance, International Electrotechnical Commission, IEC 60044-6,*
- [8] *IEEE Standard requirements for Instrumental Transformers, IEEE Power Engineering Society C57.13-2007.*
- [9] *IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes, IEEE Power Engineering Society C37.110-2007*

- [10] Cahier technique no. 195, Current transformers: specification errors and solutions, Schneider Electric, <http://www.schneider-electric.com>
- [11] Theory for CT SAT Calculator (PSRC), Spreadsheet originated by the IEEE PSRC committee responsible for C37.110 "IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes"
- [12] Beyond the Knee Point - A Practical Guide to CT Saturation, Ariana Hargrave, Michael J. Thompson, and Brad Heilman, *72nd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*, Atlanta, Georgia, 2018
- [13] Blackburn, J. L., *Protective Relaying, Principles and Applications*. New York: Marcel Decker, Inc., 1987
- [14] www.digsilent.com
- [15] Current Transformer (StaCT), Technical Reference Documentation, DlgSILENT PowerFactory 2017
- [16] Two-Winding Transformers (ElmTR2, TypTr2), Technical Reference Documentation, DlgSILENT PowerFactory 2017
- [17] Transformer Differential Protection / 7UT6, SIPROTEC 4 7UT6 differential protection relay for transformers, generators, motors and busbars, Siemens SIP Edition No. 7
- [18] SIPROTEC 4, 7UT6x, Manual C53000-G1176-C230-5, Edition 09.2016
- [19] DlgSILENT PowerFactory, Relay Model Description ,Siemens 7UT6xx, Version 002, Technical Reference Documentation
- [20] Doble Engineering Company, <https://www.doble.com/>
- [21] TransWin 3.3, User's Guide, Doble Engineering Company
- [22] DIGSI 4, Operation Software for SIPROTEC 4, SIPROTEC Compact, SIPROTEC 3 and SIPROTEC 2 protection devices

Abstract: In the paper the analyses of the current transformer saturation influence to operation of differential protection are presented. Analyses are performed using a simulation tool and a relay model, as well as using the physical relay by injecting test currents from test equipment on relay inputs. The comparison of relay behavior in these two analyses has been performed and discussed. Network modeling has been performed in DlgSILENT PowerFactory and physical relay testing using DOBLE test equipment.

Keywords: current transformer saturation, transformer differential protection, software simulations, relay testing

Analysis of Operation of Transformer Differential Protection Under Current Transformer Saturation – Software Simulations and Relay Testing

Nikola Sučević, Saša Gligorov, Zoran Stojanović

Рад примљен у уредништво: 22.11.2021. године.

Рад прихваћен: 28.12.2021. године.