



СИМУЛАЦИЈА И ТЕСТИРАЊЕ РАДА УПРАВЉАЧКЕ ЈЕДИНИЦЕ РЕКЛОЗЕРА У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУ

SIMULATION AND TESTING OF RECLOSER CONTROL UNIT IN REAL-TIME OPERATIONS

Андреа Павловић, Невен Ковачки, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – Овај рад обрађује симулацију и тестирање рада управљачке јединице реклозера ABB RER615 у симулационом окружењу Turphoon HIL, уз интеграцију са симулатором HIL604 преко уређаја Universal HIL Connect. Примјеном методологије Controller Hardware-in-the-Loop (C-HIL) омогућено је тестирање стварне управљачке јединице без потребе за сложеним лабораторијским условима. Кратки спојеви се симулирају безбједно и поновљиво, што унапређује верификацију заштитних функција. Симулације су обухватиле различите типове кварова и трајања поремећаја, уз анализу реакције прекострујне заштите и логике аутоматског поновног укључења.

Кључне речи: управљачка јединица реклозера, кратак спој, заштита, аутоматско поновно укључење, симулација

Abstract – This paper deals with the simulation and testing of ABB RER615 recloser control unit within the Turphoon HIL simulation environment, integrated with the HIL604 simulator via the Universal HIL Connect device. By applying the Controller Hardware-in-the-Loop (C-HIL) methodology, real control unit testing is enabled without the need for complex laboratory conditions. Short circuits are simulated safely and repeatably, enhancing the verification of protection functions. The simulations covered various fault types and disturbance durations, with analysis of the overcurrent protection response and automatic reclosing logic.

Keywords: recloser control unit, short circuit, protection, automatic reclosing, simulation

1. УВОД

Савремени електроенергетски системи (ЕЕС) све више се ослањају на дигиталне технологије и интелигентне електронске уређаје ради унапређења поузданости, флексибилности и ефикасности дистрибутивних мрежа (ДМ). У том контексту, реклозери представљају један од најшире коришћених

елемената у аутоматизацији ДМ, омогућавајући брзо отклањање поремећаја и смањење времена прекида напајања, јер се након краткотрајног квара самостално поново укључују путем механизма аутоматског поновног укључења АПУ. Поред основне функције прекидања и АПУ, савремени реклозери омогућавају напредну дијагностику, комуникацију и интеграцију са SCADA системима. Њихова примјена значајно доприноси стабилности ДМ и селективности заштите у оквиру ДМ [1].

Традиционалне методе тестирања управљачких функција ових уређаја захтијевају сложене и често ризичне лабораторијске услове. Као одговор на те изазове, све више се примјењује C-HIL методологија, која омогућава директно повезивање стварног управљачког уређаја са симулатором који у реалном времену израчунава електроенергетске услове система. У оквиру овог приступа, Turphoon HIL софтвер се користи за моделовање дистрибутивне мреже, док се симулација извршава на хардверском симулатору реалног времена. Повезивање управљачке јединице са симулатором реализује се преко Universal HIL Connect (УНС) уређаја, који врши конверзију аналогних сигнала у опсегу ± 10 V из симулатора реалног времена у одговарајуће аналогне сигнале за физички уређај, чиме се обезбјеђује стабилна и прецизна интеракција између симулираног модела и стварног хардвера.

На тај начин, уређај управља симулираним објектом као да је у стварном окружењу, чиме се омогућава прецизна анализа одзива, верификација алгоритама и безбједно тестирање без потребе за физичким моделима или опасним испитивањима [2].

2. РЕЛЕЈНА ЗАШТИТА У ДИСТРИБУТИВНИМ МРЕЖАМА

Кварови у ЕЕС најчешће настају услед оштећења изолације, атмосферских пражњења, механичких напрезања или контакта са страним тијелима као што су гране, птице или влага. У средњенапонским мрежама, овакви поремећаји могу довести до кратког споја (КС), прекида у напајању и оштећења опреме. Због тога је неопходна системска заштита која брзо, селективно и поуздано реагује на поремећаје у раду мреже.

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Невен Ковачки, доцент

Та функција се остварује кроз релејну заштиту, на основу које прекидачка опрема изолује оштећени дио система и спрјечава ширење квара. Релејна заштита обухвата различите типове релеја, који се повезују на мјерне трансформаторе и прекидаче, а њен задатак је да надзире електричне величине и пошаље сигнал прекидачу када се прекораче подешене вриједности, на основу кога се прекидач отвара [3].

Са развојем електронских технологија и потребом за већом прецизношћу, брзином и флексибилношћу у реаговању на поремећаје, класични електромеханички релеји постепено су замијењени дигиталним рјешењима. Тако је настао концепт микропроцесорске релејне заштите, који обједињује више функција у једном уређају и омогућава напредну обраду сигнала и комуникацију.

2.1. Микропроцесорска релејна заштита

Микропроцесорски релеји представљају најсавременији облик релејне заштите, који обједињује више функција у једном уређају. Улазни сигнали се дигитално обрађују, пореде са референтним вриједностима, а уређај реагује активирањем прекидача, снимањем догађаја или обавјештавањем оператера. Поред основне заштитне функције, омогућена је и анализа поремећаја, локална и даљинска конфигурација, као и интеграција у надзорне системе.

Ови релеји подржавају самодијагностику, даљински надзор и комуникацију са SCADA системима, уз подршку за стандардне протоколе као што су IEC 61850, Modbus, DNP3 итд. Примјена алгоритама као што су дискретна Фуријеова трансформација и модели у простору стања омогућава прецизну идентификацију кварова. Захваљујући брзини, флексибилности и могућности адаптације, микропроцесорска заштита постаје стандард у модерним ЕЕС [4].

2.2. Прекострујна заштита

Прекострујна заштита је најстарији и најраспрострањенији облик релејне заштите. Њена основна функција је да детектује струју већу од подешене и иницира искључење оштећеног дијела система. Примјењује се на водовима, трансформаторима и другим елементима мреже.

У радијалним мрежама користи се неусмјерена прекострујна заштита, док се у сложенијим топологијама примјењује усмјерена варијанта. Подешавање релеја врши се на основу прорачуна нормалних режима и очекиваних струја КС, уз уважавање захтјева за селективност и брзину реаговања [4].

3. КОНСТРУКЦИЈА И ПРИНЦИП РАДА РЕКЛОЗЕРА

У средњенапонским ДМ, већина кварова је пролазног карактера и траје само неколико секунди. Без реклозера, сваки квар узрокује испад цијелог вода и захтијева теренску интервенцију. Реклозери омогућују АПУ, чиме се пролазни кварови превазилазе без трајног прекида нападања.

Реклозер је прекидач са самосталним управљањем који детектује прекомјерну струју и извршава више циклуса отварања и затварања. У случају трајног квара, уређај прелази у режим закључавања до ручне интервенције. Постављају се дуж извода ради секционисања и селективне заштите, а не користе се на подземним водовима због трајне природе кабловских кварова.

Савремени реклозери имају вакуумски прекидач, управљачки орман, сензоре, комуникационе интерфејсе и заштитне функције. Подржавају даљинско управљање, дијагностику, снимање догађаја и интеграцију у SCADA системе [1, 3].

RER615 је савремени микропроцесорски управљачки уређај намијењен примјени у средњенапонским ДМ, са подршком за заштиту, управљање, аутоматизацију и анализу квалитета електричне енергије. Заснован је на серији Relion 615 и у потпуности подржава IEC 61850 и GOOSE, што омогућује интеграцију у напредне SCADA системе, вишеструко АПУ, рад у радијалним и упетљаним мрежама, као и конфигурацију преко софтверског алата РСМ600. Управљање се може врши локално преко НМI панела или даљински, уз подршку за више комуникационих протокола.

Основне функције укључују прекострујну и земљоспојну заштиту, термичку заштиту, провјеру синхронизације и напредну дијагностику. Уређај се испоручује у конфигурацијама А, D и Е. У овом раду тестирана је конфигурација D [5]. На слици 1 приказан је изглед предње стране управљачке јединице АBB RER615, са НМI панелом који омогућава локално управљање и надзор параметара током рада.



Слика 1. Изглед предње стране управљачке јединице реклозера АBB RER615 [5]

4. СИМУЛАЦИЈА РАДА УПРАВЉАЧКЕ ЈЕДИНИЦЕ РЕКЛОЗЕРА У ТУРНООН НIЛ ОКРУЖЕЊУ

Развој компоненте „RER615 Circuit Breaker and Measurements“ у оквиру Turphoon NIL платформе започет је унутар Schematic Editor-a, гдје је графички моделована структура управљачке јединице реклозера АBB RER615. Компонента је концептирана тако да обухвата трофазни прекидач, трофазне мјерне јединице, дигиталне улазе и излазе, као и логичке блокове који одговарају стварној конфигурацији уређаја. Сви елементи су повезани са сигнаlima симулатора, а параметри као што су називни напон, струја и логички услови дефинисани су унутар

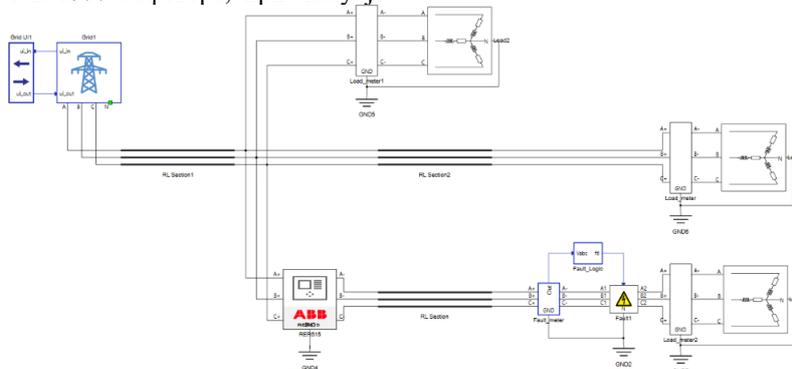
картица компоненте у којима се подешавају технички параметри управљачке јединице. Ови параметри морају бити усклађени са конфигурацијом уређаја ABB RER615, која се врши преко PCM600 софтвера, како би се обезбиједила тачна симулација и поуздана интеракција са физичким уређајем. Маскирање компоненти у један подсистем омогућило је управљање унутрашњом структуром преко Python функција, уз динамичко прилагођавање изгледа и понашања компоненте. Повезивањем са физичким уређајем преко УНС, обезбијеђена је директна интеракција између симулираног модела и стварне управљачке јединице, што је приказано на слици 2. Оваква архитектура омогућава реалистичну симулацију понашања уређаја у различитим оперативним условима, без потребе за физичким моделом мреже.



Слика 2. Физичка интеграција управљачке јединице у тестно окружење

5. ТЕСТИРАЊЕ РАДА УПРАВЉАЧКЕ ЈЕДИНИЦЕ РЕКЛОЗЕРА У TYRHOON HIL ОКРУЖЕЊУ

Након развоја компоненте „RER615 Circuit Breaker and Measurements“ унутар Schematic Editor-a, она је интегрисана у симулациони модел дистрибутивне мреже, што је приказано на слици 3. АПУ је конфигуриран унутар управљачке јединице реклозера ABB RER615 преко PCM600 софтвера, при чему је



Слика 4. Модел мреже у Schematic Editor-у

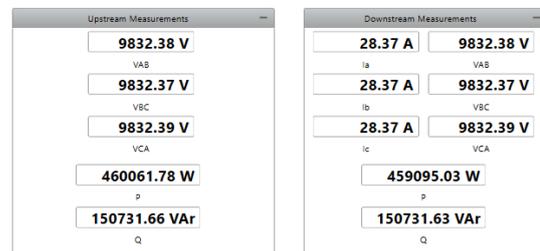
подешен на два циклуса са безнапонским паузама од 3 и 10 секунди.

Мрежни модел представља поједностављену структуру дистрибутивне мреже са линијским напонем 10 kV, трофазном снагом КС 35 MVA и фреквенцијом 50 Hz. Водови су дефинисани са подужном отпорношћу 0,32 Ω /km и реактансом 0,205 Ω /km, при чему су дужине секција:

- од извора мреже до прве сабирнице: 1 km
- иза реклозера: 1,5 km
- до крајњег потрошача: 3 km

На воду су прикључена три потрошача са снагама од 500 kVA, 300 kVA и 200 kVA, уз факторе снаге од 0,95, 0,97 и 0,98. Између реклозера и потрошача постављена је компонента „Fault“, која омогућава симулацију различитих типова КС и дефинисање њиховог трајања.

Симулација је спроведена у реалном времену, уз надзор преко HIL SCADA панела и HMI екрана управљачке јединице. По читавању HIL SCADA панела, који омогућава надзор аналогних и дигиталних сигнала, као и интеракцију са управљачком јединицом реклозера ABB RER615 може се приступити подпанелу компоненте „RER615 Circuit Breaker and Measurements“, у којем се налази команда „External Close Command“ (спољна команда за затварање). Активирањем ове команде, управљачка јединица ABB RER615 шаље сигнал прекидачу да затвори контакте, чиме се омогућује напајање потрошача иза реклозера. На слици 4 приказана су мјерења на реклозеру унутар HIL SCADA панела.



Слика 3. Приказ мјерења на реклозеру у HIL SCADA панелу

Подаци о струјама и напонима доступни су и на LCD екрану управљачке јединице, што потврђује синхронизацију између симулатора и физичког уређаја, као што је приказано на слици 5.



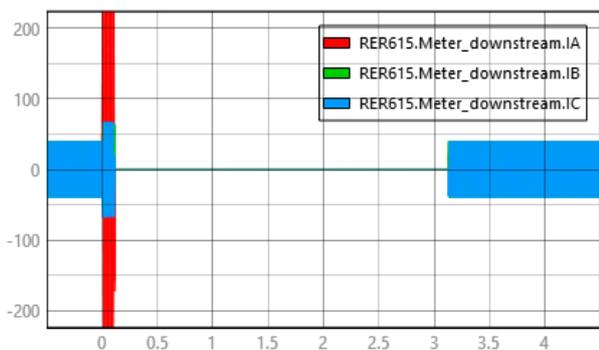
Слика 5. Приказ мјерења на управљачкој јединици током симулације у реалном времену

У оквиру прозора „Fault“, у HIL SCADA панелу, могуће је одабрати тип КС и његово трајање, чиме се иницира поремећај у мрежи и активира заштитна логика уређаја.

Иако су у оквиру истраживања тестирани сценарији са три различита трајања поремећаја (1 s, 5 s и трајни) за једнофазне (А–N) и трофазне (А–В–С) кратке спојеве, због ограничења простора у овом раду приказани су само резултати за једнофазан кратак спој са трајањем квара од 1 секунде.

На слици 6 приказан је одзив управљачке јединице реклозера ABB RER615 током једнофазног КС А–N. Квар се јавља у тренутку $t=0$ s, након чега управљачка јединица преко заштитне функције прекострујне заштите са струјно-независном карактеристиком детектује поремећај и активира заштитну реакцију. Прекидач се отвара 114 ms након појаве квара.

Струје иза реклозера падају на нулу и остају у том стању током безнапонске паузе од 3 секунде. Сигнал квара се гаси након 1 секунде, а прекидач се затвара по истеку безнапонске паузе, чиме се напајање потрошача наставља. Потрошачи испред реклозера остају под напајањем током читавог поремећаја.



Слика 6. Графички приказ мјерених струја на управљачкој јединици реклозера ABB RER615 током симулације

Овај резултат потврђује исправност конфигурације функције АПУ и синхронизовану реакцију управљачке јединице у условима симулације у реалном времену. На основу добијених резултата, може се закључити да је уређај ABB RER615 у конфигурацији D способан да поуздано изврши заштитну селекцију и АПУ у складу са дефинисаном логиком.

6. ЗАКЉУЧАК

Циљ овог рада био је да се развије и тестира библиотечка компонента управљачке јединице реклозера ABB RER615 у симулационом окружењу Турхоон HIL, уз интеграцију са симулатором HIL604 у реалном времену. Потврђено је да компонента вјерно реплицира понашање уређаја, а да је комуникација са симулатором стабилна и технички поуздана. Примјеном С–HIL методологије омогућено је безбједно, поновљиво и ефикасно тестирање заштитних функција без потребе за ризичним лабораторијским испитивањима. Овај приступ показао се као изузетно ефикасан за верификацију заштитних алгоритама, анализу реакције уређаја на различите типове кварова, као и процјену селективности и стабилности система у условима прелазних стања. Додатна предност овог приступа огледа се у могућности брзе реконфигурације тест сценарија и проширења модела без потребе за физичким интервенцијама. На тај начин, симулационо окружење постаје флексибилан алат за инжењерску анализу, развој и верификацију интелигентних електронских уређаја у складу са захтјевима савремених ЕЕС.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. L. Blackburn, T. J. Domin: *Protective Relaying – Principles and applications*, fourth edition, Taylor & Francis, 2014.
- [2] A. Genić, O. Gagarica, „Controller Hardware-In-the-Loop Simulation: Step by step guide“, *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, 2023.
- [3] J. Nahman, V. Mijailović: *Razvodna postrojenja*, drugo izdanje, Akademska misao, Beograd, 2015.
- [4] D. Bekut: *Relejna zaštita*, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2009.
- [5] ABB, „Grid Automation Recloser Protection and Control RER615: Product Guide“ Version 2.0, ABB Group, 2018.

Кратка биографија:



Андреа Павловић рођена је у Фочи 1999. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Електроенергетски системи одбранила је 2022.год.

Контакт:
pavlovic.andrea@uns.ac.rs



Невен Ковачки рођен је 1987. године у Зрењанину. Дипломирао је на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Електроенергетски системи 2010., 2011. и 2018. године.

Контакт:
kovackin@uns.ac.rs