

DOI: [10.46793/CIGRE37.C4.09](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C4.09)

C4.09

СИМУЛАЦИЈА РАДА МИКРОМРЕЖЕ У РЕАЛНОМ ВРЕМЕНУ

REAL-TIME SIMULATION OF MICROGRID OPERATIONS

Јован Сандић*, Милета Жарковић, Горан Добрић

Кратак садржај: Почетак 21. века захтева озбиљно преиспитивање и анализу конвенционалног начина добијања и производње електричне енергије. Интеграција обновљивих извора и енергетских складишта у електроенергетски систем је од велике важности за обезбеђивање енергетске сигурности у складу са концептом одрживог развоја. У овом раду анализиран је модел дистрибутивне мреже у коју су интегрисани дистрибуирани извори енергије: соларне електране, ветрогенератори и системи за складиштење електричне енергије. Фокус је на испитивању њиховог рада током једногодишњег периода, уз анализу њиховог утицаја на средњенапонску мрежу, узимајући у обзир различите временске услове. Истраживање представља кључне факторе који утичу на пројектовање микромреже са циљем оптимизације производних капацитета и стабилности рада микромреже. На основу спроведених анализа, закључено је да микромреже могу значајно допринети стабилизацији напонских услова, обезбеђивању резерве енергије, као и могућности трговине енергијом на тржишту електричне енергије. Софтверским алатима попут Typhoon HIL-а, који омогућава прецизно моделовање електроенергетског система у различитим сценаријима, може се брже и прецизније доћи до анализе оваквих електроенергетских система. Симулације у реалном времену су изведене на основу реалних података, анализирајући понашање система у различитим временским условима. Ове симулације су допринеле бољем разумевању динамичког понашања микромрежа, утицаја дистрибуираних извора и важности правилног димензионисања истих, као и могућности оптимизације потрошње и складиштења енергије. Формиране симулације у реалном времену представљају основу за имплементацију и тестирање оптимизационих алгоритама у микромрежама. Рад пружа практичан увид у фазе планирања и пројектовања микромрежа и свих њених компоненти. Резултати симулација у реалном времену доприносе разумевању улоге микромрежа у енергетској транзицији и развоју одрживих електроенергетских система.

Кључне речи: *Mikromreža, Simulacije u realnom vremenu, Typhoon HIL, Distribuirani izvori energije*

* Јован Сандић, *Elsys Eastern Europe*, jovansandic@gmail.com

Милета Жарковић, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, mileta@etf.rs

Горан Добрић, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, dobric@etf.rs

Abstract: The beginning of the 21st century requires a serious reassessment and analysis of the conventional methods of obtaining and producing electrical energy. The integration of renewable energy sources and energy storage systems into the power grid is of great importance for ensuring energy security in accordance with the concept of sustainable development. This paper analyzes a model of a distribution network that incorporates distributed energy sources: solar power plants, wind turbines, and electricity storage systems. The focus is on examining their operation over a one-year period, analyzing their impact on the medium-voltage network while considering various weather conditions. The research highlights key factors influencing the design of a microgrid to optimize production capacity and ensure operational stability. Based on the conducted analyses, it has been concluded that microgrids can significantly contribute to voltage stability, provide energy reserves, and enable energy trading in the electricity market. Software tools such as Typhoon HIL, which allow precise modeling of the power system under different scenarios, can facilitate faster and more accurate analysis of such electrical energy systems. Real-time simulations were conducted based on actual data, analyzing system behavior under various weather conditions. These simulations contributed to a better understanding of the dynamic behavior of microgrids, the impact of distributed sources, and the importance of proper sizing, as well as the potential for optimizing energy consumption and storage. The real-time simulations serve as a foundation for the implementation and testing of optimization algorithms in microgrids. The paper provides a practical insight into the planning and design phases of microgrids and all their components. The results of real-time simulations contribute to understanding the role of microgrids in the energy transition and the development of a sustainable power system.

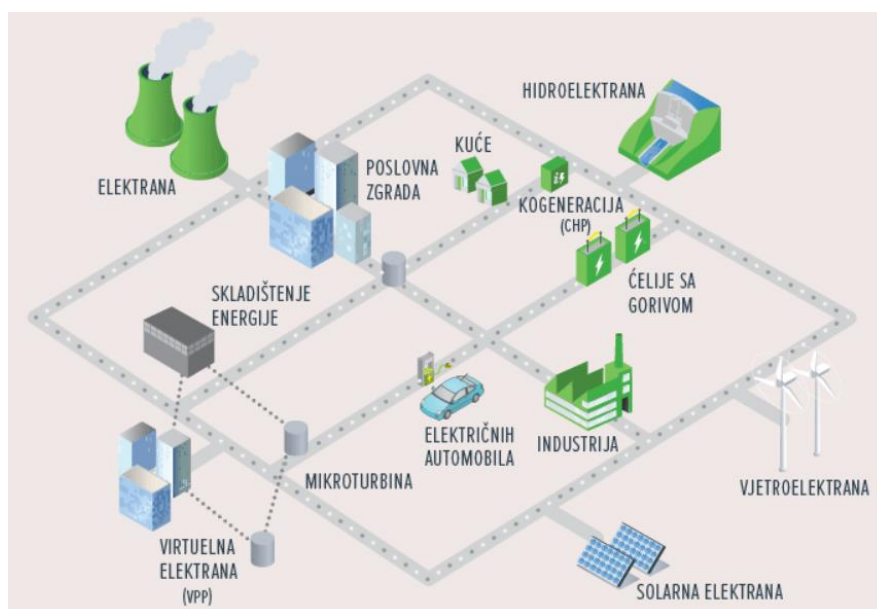
Key words: *Microgrid, Typhoon HIL, Real-time simulation, Distributed energy sources*

1. УВОД

Научни рад се бави анализом и симулацијом функционисања микромрежа које интегришу обновљиве изворе енергије и системе за складиштење у електроенергетски систем. Рад полази од проблема све већих енергетских потреба и еколошких изазова које изазива коришћење фосилних горива, као што су ефекат стаклене баште и климатске промене. Истраживање се фокусира на концепт микромрежа као локалних енергетских система који комбинују производњу, потрошњу и складиштење електричне енергије, уз могућност независног рада или повезивања са већом електроенергетском мрежом [1]. У раду су анализиране предности и изазови интеграције обновљивих извора енергије, укључујући стабилност система, управљање енергијом и техничке карактеристике микромрежа [2]. Практични део рада се бави моделовањем и симулацијом рада микромреже у софтверском алату *Typhoon HIL*, који омогућава симулирање, у реалном времену, различитих стања система и начина управљања електричном енергијом, као и тестирање контролних алгоритама са реалним микромрежним контролером [3]. Циљ транзиције ка микромрежама је максимизација искоришћења обновљивих извора и повећање поузданости система уз минимизацију губитака, које нам пружа микромрежа, као и већи степен независности од традиционалних извора енергије [4]. Закључци рада указују на значајну улогу микромрежа у енергетској транзицији и повећању енергетске независности, али уз адекватно димензионисање уређаја унутар микромреже. Истиче се да је даљи развој технологија за складиштење електричне енергије, као и напредних система управљања, кључан за успешну имплементацију оваквих система у будућности.

2. ДИСТРИБУИРАНИ ИЗВОРИ ЕНЕРГИЈЕ

Дистрибуирана производња електричне енергије дефинише се као производни систем који је директно прикључен на средњенапонску или нисконапонску дистрибутивну мрежу или је прикључен у инсталацији са потрошачке стране. Дистрибуирани извори напајају локална потрошачка подручја чиме смањују укупну потрошњу, поправљају напонске прилике и смањујући губитке у систему. Концепт изградње великих производних јединица и развоја централизованог система престаје да буде једини прихватљив и добија алтернативу у виду малих дистрибутивних капацитета који ће временом на себе преузимати значајан део потреба за енергијом. При томе је неопходно да се ова два међусобно допуњују, јер велике електране имају важну улогу у очувању стабилности и поузданости система. Примарни извори енергије у дистрибуираној производњи су углавном обновљиви и то су енергија ветра и сунчевог зрачења, али од великог значаја су и дизел електрични агрегати и системи за складиштење електричне енергије, па ће у даљем тексту бити речи о сваком од њих. [5]



Слика 1 Децентрализована дистрибуирана мрежа

2.1. Соларне електране

Фотонапонски системи представљају технологију засновану на директној конверзији сунчеве енергије у електричну путем фотонапонских ћелија организованих у модуле. Ови системи могу да обезбеде напајање потрошача без потребе за фосилним горивима, чиме доприносе енергетској одрживости и смањењу емисије угљен-диоксида. Основна предност фотонапонских система је могућност инсталације на различитим местима, укључујући кровове и зидове зграда, чиме се избегавају додатни трошкови изградње или закупа земљишта. Међутим, један од главних недостатака је релативно низак степен искоришћења енергије, који се креће између 15% и 20%, као и висока почетна цена система. Постоје различити типови фотонапонских система у зависности од начина рада. Аутономни системи користе се за напајање удаљених потрошача који нису прикључени на електродистрибутивну мрежу. Ови системи захтевају акумулаторске батерије за складиштење енергије, што омогућава напајање потрошње током ноћи или у периодима слабог сунчевог зрачења. Фотонапонски системи повезани на дистрибутивну мрежу

функционишу паралелно са њом, користећи је као резервни извор енергије и испоручујући вишкове енергије у мрежу. Ови системи се одликују једноставношћу, нижом ценом и елиминацијом потребе за локалним складиштењем енергије. Хибридни фотонапонски системи комбинују различите изворе енергије, као што су соларни панели и акумулаторске батерије, ради повећања поузданости напајања. Ови системи се често користе у удаљеним подручјима, где је обезбеђивање стабилног напајања приоритет.

2.2. Ветроагрегати

Ветроелектране представљају значајан облик дистрибуираних извора енергије који користе кинетичку енергију ветра за производњу електричне енергије. Овај процес се одвија кроз ветротурбине које трансформишу кинетичку енергију ветра у механичку, а затим у електричну енергију уз помоћ генератора. Ветроагрегат, као функционална целина, састоји се од ветротурбине, редуктора, генератора, блок трансформатора, система за контролу и управљање, као и стуба са темељом. Савремени ветрогенератори имају снагу у распону од 100 kW до 5 MW, са максималним степеном искоришћења око 45%. Ветроагрегати су најчешће трокрилни, а осовина турбине омогућава прилагођавање правцу ветра. Ефикасност ветроелектране зависи од брзине ветра, која треба да буде најмање 6 m/s да би изградња била економски исплатива. Ветроелектране се могу градити како на копну (*onshore*), тако и на мору (*offshore*). Производња електричне енергије из ветра је директно повезана са брзином ветра, густином ваздуха и површином ротора. Техно-економски фактори ограничавају употребу енергије ветра на области са брзинама од 5 m/s до 25 m/s. У случају наглих удара ветра, неопходне су велике балансне снаге ради стабилизације система. Увођењем ветроелектрана у електроенергетски систем јављају се и изазови, попут потребе за додатним складиштењем енергије и флексибилним баланским капацитетима.

2.3. Системи за складиштење електричне енергије

Један од кључних изазова у савременом електроенергетском систему представља складиштење електричне енергије, посебно када је реч о вишковима који настају из обновљивих извора, као што су соларне електране и ветроагрегати. Ове изворе карактеришу варијабилност и непредвидивост производње, што може довести до дисбаланса између производње и потрошње. У циљу обезбеђивања поузданог и стабилног снабдевања електричном енергијом, развијени су различити системи за складиштење који омогућавају оптималну интеграцију обновљивих извора у електроенергетску мрежу. Електрична енергија, за разлику од других облика енергије, не може се ефикасно складиштити у великим количинама, већ се мора трошити у реалном времену. Због тога је потребно имати додатне резерве електричне енергије које могу надокнадити флукуације у производњи и потрошњи. Одступања у балансу могу довести до поремећаја у систему, што у најгорем случају резултира прекидом снабдевања великог броја потрошача. Системи за складиштење електричне енергије могу се поделити у неколико категорија. Хемијски системи, као што су акумулаторске батерије, користе електрохемијске реакције за складиштење енергије. Примарне батерије нису пуњиве, док се секундарне батерије, попут оловних и никл-кадмијумских, могу вишеструко пунити и празнити. Посебно место у системима за складиштење заузимају горивне ћелије, које користе хемијску енергију из синтетичких горива за производњу електричне енергије. Поред хемијских система, механички системи попут пумпно-акумулационих електрана користе вишак електричне енергије за пумпање воде у резервоаре на већој висини, одакле се касније производи електрична енергија кроз хидроагрегате. Компримовани ваздух и замајци су такође у употреби, док се истражују и нове технологије попут

суперкондензатора и термалног складиштења. Сви ови системи имају за циљ повећање стабилности електроенергетских мрежа и ефикаснију интеграцију обновљивих извора енергије.

3. МИКРОМРЕЖЕ

Микромреже представљају савремени концепт у области електроенергетике који подразумева локалне, децентрализоване енергетске системе способне да раде аутономно или у координацији са главном електроенергетском мрежом. Основна идеја микромрежа је интеграција различитих дистрибуираних извора енергије, као што су фотонапонски системи, ветроелектране, дизел агрегати и системи на биомасу, заједно са системима за складиштење енергије и интелигентним управљачким јединицама. Као такав, овај концепт одговара на све већу потребу за енергетском сигурношћу, флексибилношћу, као и за већом применом обновљивих извора енергије, што је посебно значајно у условима енергетске транзиције и глобалног тренда самоодрживих заједница. Микромреже се данас успешно примењују у различитим срединама – од удаљених руралних насеља која немају приступ стабилној мрежи, преко урбаних делова где се користе за смањење оптерећења на постојећу инфраструктуру, до индустријских зона и критичних установа као што су болнице, где се захтева висока поузданост и континуитет у снабдевању енергијом. У оквиру овог рада, посебна пажња је посвећена симулацији рада микромреже са обновљивим изворима у *Typhoon HIL* окружењу, при чему су анализирани различити сценарији производње, складиштења и потрошње енергије. Овакве симулације омогућавају тестирање система пре њихове реалне примене, правилном димензионисању елемената, идентификацију критичних тачака и унапређење стабилности и ефикасности енергетских токова. Развој и имплементација микромрежа представљају кључни корак ка децентрализованој и одрживој енергетској будућности, посебно у контексту све интензивније примене обновљивих извора енергије.

3.1. Структура микромрежа

Микромрежа представља комплексну, али флексибилну енергетску целину која обједињује различите подсистеме производње, потрошње и складиштења електричне енергије, омогућавајући њихову координацију и самостално управљање. Основу структуре микромреже чине дистрибуирани извори енергије, системи за складиштење енергије, као и различити типови потрошача – од стамбених објеката до великих индустријских система. Централну улогу у функционисању микромреже има систем за управљање енергијом (*Energy Management System – EMS*), који оптимизује рад извора, прати стање складишта, регулише токове енергије и прилагођава потрошњу у складу са тренутним производним и мрежним условима. *EMS* користи податке добијене путем сензора и комуникационих интерфејса како би обезбедио ефикасан рад микромреже у реалном времену. Информациони и комуникациони слој микромреже, који обухвата *SCADA* системе, паметна бројила и комуникационе протоколе, омогућава надзор, дијагностику и координацију рада свих компоненти микромреже. Апликациони слој користи ове податке за примену алгоритама за оптимизацију, предикцију и доношење одлука. Оваква хијерархијска и модуларна организација чини микромрежу способном за флексибилан и поуздан рад, чак и у условима поремећаја у главној електроенергетској мрежи. У пракси, све чешће се срећу хибридне микромреже које комбинују различите типове извора и режим рада, зависно од енергетских и економских услова. Независно од типологије, микромреже имају заједничке циљеве: повећање поузданости, флексибилности и енергетске независности, као и ефикасну интеграцију обновљивих извора у савремени електроенергетски систем.

3.2. Класификација микромрежа

Микромреже се могу класификовати према различитим критеријумима, од којих су најзначајнији: режим рада, географска локација, намена и конфигурација извора. Основна подела прави разлику између микромрежа повезаних на главну мрежу (*grid-connected*) и изолованих (*off-grid*) микромрежа. Повезане микромреже функционишу у координацији са главном дистрибутивном мрежом, омогућавајући размену енергије и користећи мрежу као резервни извор напајања или као "посредника" за продају вишкова енергије. Са друге стране, изоловане микромреже су потпуно самосталне, ослањају се искључиво на сопствену производњу и складиште енергије и често се користе у удаљеним или енергетски нестабилним подручјима. У зависности од локације и типа потрошача, микромреже се деле на урбане, сеоске, индустријске и мобилне. Урбане микромреже се најчешће срећу у насељеним градским зонама и обухватају објекте са соларним панелима, системима за складиштење и интелигентним контролним јединицама. Сеоске микромреже се користе за снабдевање мањих и удаљених заједница, при чему се често примењују комбинације фотонапонских и ветроелектрана уз батеријску акумулацију. Индустријске микромреже служе великим производним системима, фабрикама или технолошким парковима и често укључују когенеративне јединице и системе са високим степеном аутоматизације. Мобилне микромреже представљају преносиве и брзо распоредиве системе који се користе у војним, хуманитарним или ванредним ситуацијама. Поред ових, све чешћа је и примена хибридних микромрежа, које обједињују више различитих типова извора енергије (нпр. соларна енергија + дизел генератори + батерије) и режима рада у складу са конкретним потребама. Ова класификација омогућава да се микромреже пројектују прилагођено специфичним техничким, економским и еколошким условима, чинећи их кључним алатом за реализацију концепта паметних и одрживих енергетских система.

4. МОДЕЛ МИКРОМРЕЖЕ У TYPHOON HIL ОКРУЖЕЊУ

4.1. Typhoon HIL окружење

Typhoon HIL представља напредну симулациону платформу дизајнирану за развој, тестирање и верификацију система за управљање енергијом и енергетских електронских уређаја у реалном времену. У питању је први индустријски алат који је у потпуности посвећен *HIL - Hardware-in-the-Loop* симулацијама, што значи да омогућава директно повезивање симулираних система са стварним контролерима и другим хардверским компонентама. Платформа користи *FPGA - Field-programmable gate array* архитектуру која омогућава веома брзу симулацију динамичких процеса, са временском резолуцијом до неколико наносекунди. Софтверски део *Typhoon HIL*-а састоји се од неколико модула, од којих је најзначајнији *Typhoon HIL Control Center* – графички интерфејс у коме се врши моделовање електроенергетског система, дефинисање параметара, повезивање компоненти и покретање симулације. Уз овај алат се користи и *SCADA Editor*, који омогућава креирање контролних панела за праћење и управљање симулацијом у реалном времену. Предности ове платформе укључују висок степен тачности симулације, лаку интеграцију са стварним уређајима, подршку за различите типове извора и оптерећења, као и флексибилност у дизајнирању и тестирању сценарија рада микромрежа.

4.2. Конфигурација микромреже у симулационом окружењу

У оквиру овог рада, симулирана микромрежа обухвата више компоненти, које заједно чине целовит модел са могућношћу рада у паралелном или изолованом режиму. Моделовање је реализовано коришћењем унапред дефинисаних блокова у *Typhoon HIL Control Center*-у, који су параметризовани према реалним техничким карактеристикама:

PV Power Plant (Generic) представља модел фотонапонске електране који укључује једносмерно-наизменични претварач, улазни L-филтер, трансформатор и контакторе. Улази се дефинишу ручно преко SCADA панела, где се задају вредности као што су линијски напон, фреквенција и активна снага.

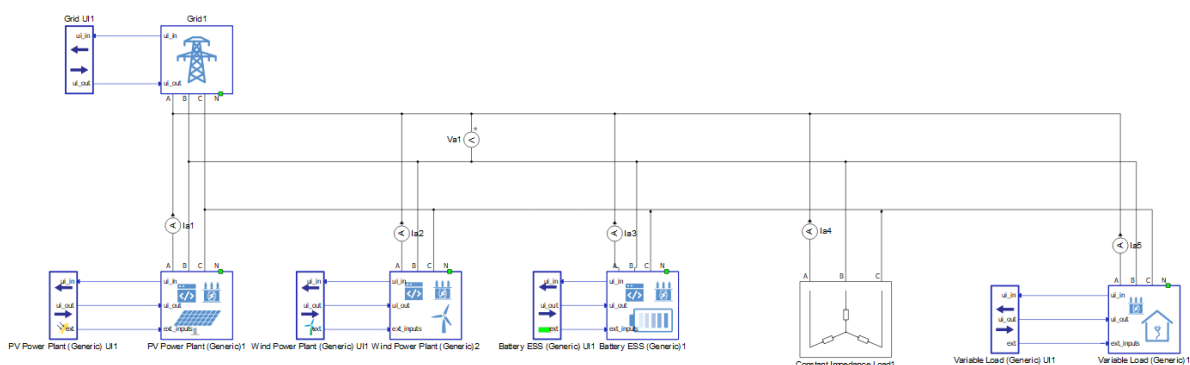
Wind Power Plant (Generic) моделује ветроелектрану са AC-DC-AC претвараčem, контролом тока струје и трансформатором. Брзина ветра се уноси преко табеле која дефинише временску варијацију, што омогућава реалистичну симулацију утицаја флукутација производње.

Battery EES (Generic) представља блок система за складиштење електричне енергије, састављен од претварача, филтера и трансформатора. Ова компонента игра кључну улогу у балансирању енергетских токова, посебно у условима неусклађености производње и потрошње.

Variable Load (Generic) омогућава унос сценарија потрошње у различитим временским интервалима, што симулира понашање стварног оптерећења. Оптерећење се може дефинисати као стално, временски зависно или случајно варијабилно.

Grid блок се користи за симулацију повезаности микромреже са главном дистрибутивном мрежом. Овај блок омогућава задавање напонских услова и фреквенције, као и тестирање услова рада у „*grid-connected*“ и „*islanded*“ режиму.

Сви ови блокови су повезани у једну целину кроз симулациону шему у којој се енергетски токови и управљачки сигнали размењују у складу са дефинисаним сценаријима.



Слика 2. Изглед микромреже у симулацији

4.3. Употреба SCADA интерфејса

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) интерфејс у оквиру *Typhoon HIL* платформе представља алат за надзор и управљање током симулације. У овом раду, *SCADA* панел је коришћен за унос параметара као што су излазна снага извора, стање

напуњености батерија, временски зависно оптерећење, као и праћење свих релевантних електричних величина (напрезање, струја, фреквенција, напон и снага). Интерфејс омогућава визуелизацију рада сваке појединачне компоненте кроз графиконе и дигиталне индикаторе, чиме се добија јасна слика динамике система.

5. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈЕ

У овом раду симулирана је мања микромрежа која је повезана на средњенапонску дистрибутивну мрежу 20kV. Параметри микромреже се налазе у табели испод.

Табела: Параметри *digital twin-a* у симулацији

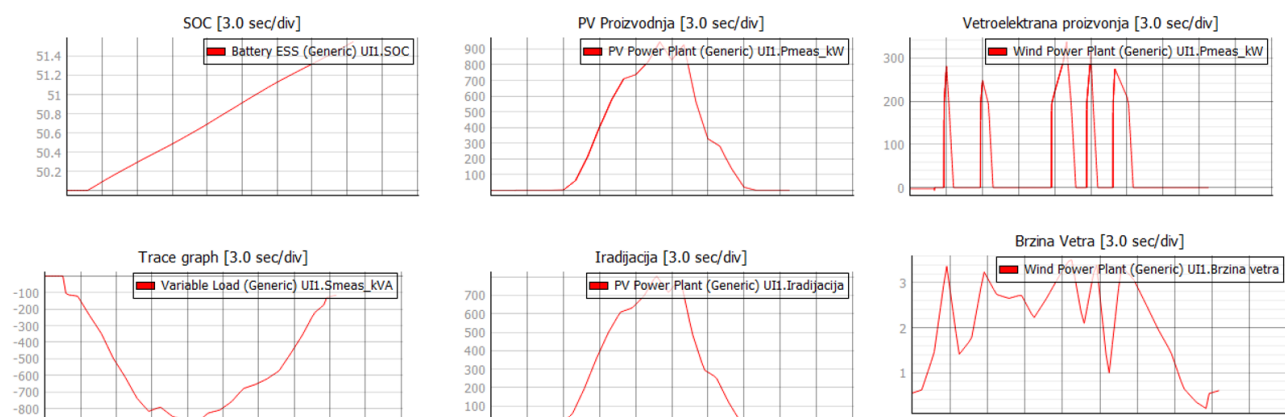
Елемент микромреже	Опис / Вредност
Тип мреже	Средњенапонска дистрибутивна мрежа, 20 kV
Соларна електрана	Номинална активна снага: 1 MW
Ветроелектрана	Номинална активна снага: 5 MW
Систем за складиштење енергије	Максимална излазна снага: 0.4 MW
Капацитет система за складиштење	4 MWh
Потрошња – константни део	Снага: 1 MW
Потрошња – променљиви део	Промене варијабилне потрошње и фактора снаге се дешавају на сатном нивоу током године

Треба обратити пажњу да је сваки од елемената повезан на средњенапонску мрежу преко сопственог трансформатора 0.4kV/20kV, који се на моделу не виде директно. Подаци који су коришћени у симулацији су добијени за подручје Благоевграда, Бугарска, где су мерене вредности ирадијације, температуре, брзине ветра, као и потрошње за сваки сат у години. Подаци о димензионисању елемената микромреже преузети су из већ постојеће микромреже, с тим што су скалирани односом стварне потрошње те микромреже и симулиране микромреже из овог рада. Симулациони корак је 1 секунд, који предстаља заправо рад система у току једног часа.

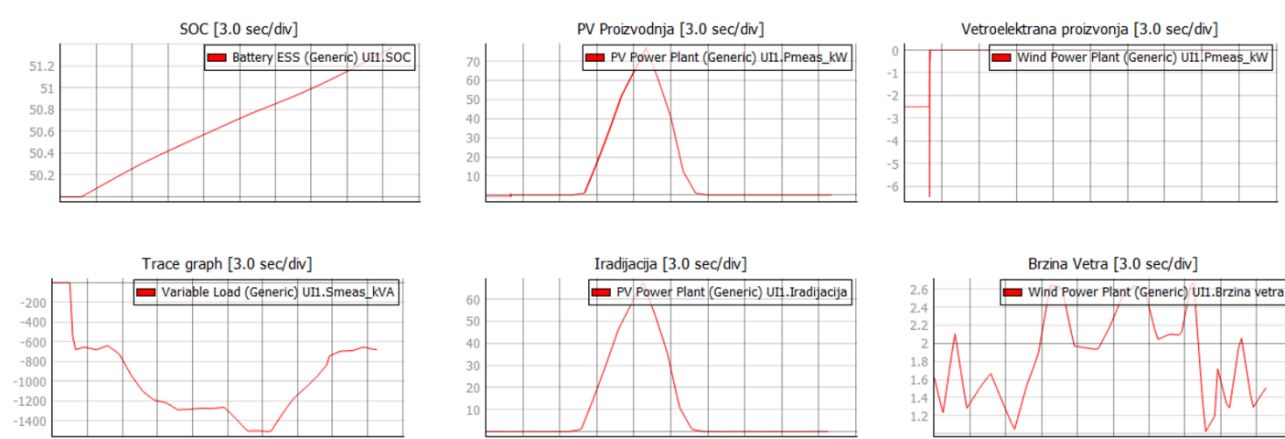
Соларна електрана као улазне податке узима промену ирадијације и температуре у времену, те је и излазна снага променљива током времена. Ветроелектрана као улазне податке има брзину ветра на висини ветроагрегата, чији сатни подаци су претходно припремљени и екстраполирани са висине мерне опреме на висину ветроагрегата. Систем за складиштење електричне енергије има контролер који пуни батеријски систем, када постоји производња из обновљивих извора енергије, те се по потреби може празнити и учествовати у одржавању стабилности мрежног напона и фреквенције, уколико се то захтева од овог подсистема.

На сликама 3 и 4 приказани су просечан јулски и децембарски дан, те промене стања у системима током једног дана. Треба обратити пажњу да је у оба случаја SOC – *State of*

Charge батеријског система кренуо од 50%, што искључиво зависи од начина управљања ОВИМ СИСТЕМОМ.



Слика 3. Просечан јулски дан



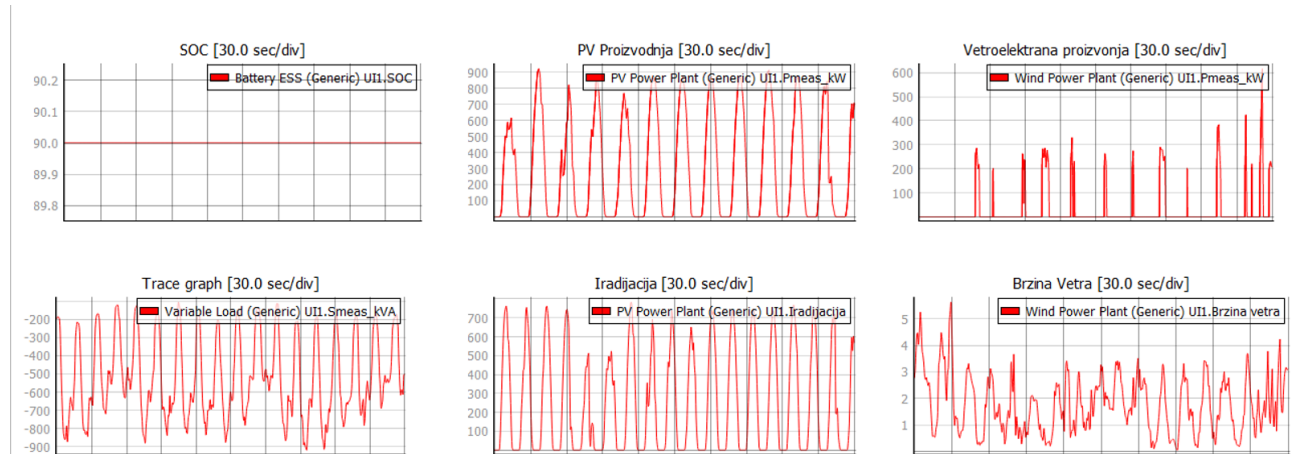
Слика 4. Просечан децембарски дан

Као што се са графика може видети, укупна електрична енергија из обновљивих извора енергије директно пуни батерију, где је лети брже пуњење због пораста просечне сатне вредности ирадијације, те самим тим и пораста производње електричне енергије. Са графика се такође може приметити да је и просечна сатна потрошња у децембру већа за 70-80% у односу на јул, што је такође очекивано због повећаног коришћења термичких уређаја на електричну енергију и то посебно у вечерњим сатима. Са друге стране, просечна сатна брзина ветра има релативно ниске вредности током оба приказана периода, тако да је производња из ветроагрегата ниска и сама ветроелектрана има јако низак фактор искоришћења. У случају када би се планирала изградња ветроелектране на овој позицији, морале би се одрадити детаљније анализе фактора искоришћења и процене исплативости овакве инвестиције.

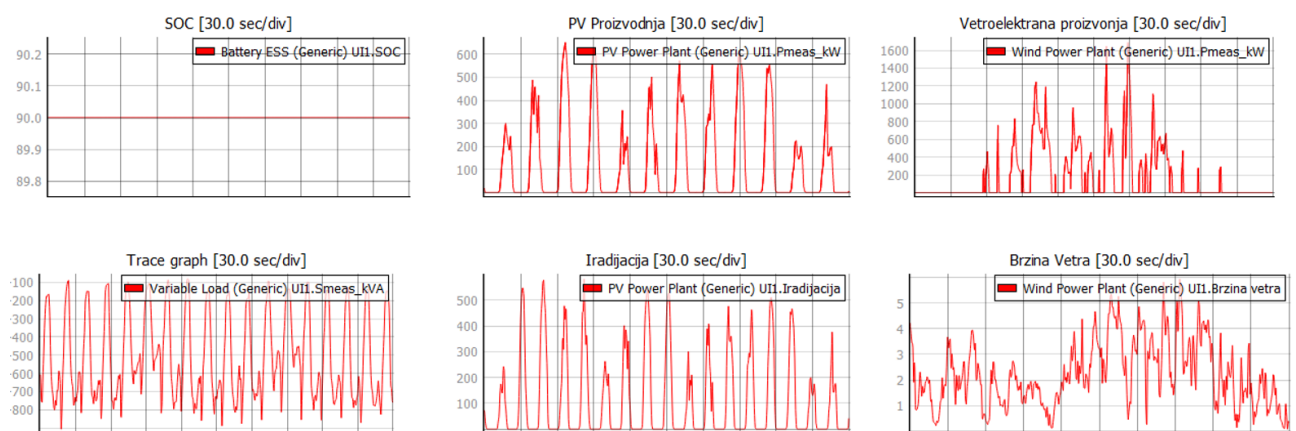
На слици 5 су приказане просечне недељне вредности производње и потрошње у симулираној микромрежи у летњем периоду, које такође потврђују закључке из претходног параграфа: вредности брзине ветра су изузетно ниске, вредности ирадијације су очекиване за поднебље којем припада зона у којој су извршена мерења. Може се приметити да се на графику потрошње појављују два *peak*-а, један око поднева и други

предвече, с тим да је разлика у томе што подневни *peak* знатно виши у односу на вечерњи, због повећане потрошње електричне енергије услед коришћења уређаја за климатизацију.

На слици 6 је, ради поређења, приказана просечна зимска недеља, на којој је могуће приметити да је ирадијација мања у односу на летњи период, али такође и да се повећала брзина ветра, што је и очекивано за северну хемисферу и позицију зоне мерења. *Peak* максималне дневне потрошње се померио са поднева на предвече, што је проузроковано коришћењем грејних уређаја током јесењих и касније зимских месеци.



Слика 5. Просечна вредности производње и потрошње микромреже у просечној летњој недељи



Слика 6. Просечне вредности производње и потрошње микромреже у просечној зимској недељи

6. ЗАКЉУЧАК

У овом раду представљен је појам микромреже и кроз софтверски пакет компаније *Turphoon HIL* урађена је симулација једног оваквог система уз имплементацију контроле уређаја. У овом раду приказани су обновљиви извори енергије који су примењени у моделовању микромреже у симулационом софтверу, при чему је посебна пажња посвећена њиховим техничким карактеристикама и улози у укупном енергетском балансу система. Детаљно је описан концепт микромрежа, њихова структура и архитектура, као и различити модели примене у пракси. Акценат је стављен на значај микромрежа у будућем развоју електроенергетског система, с обзиром на њихову способност да

интегришу обновљиве изворе енергије, повећају поузданост и отпорност система и омогуће локализовано управљање енергетским токовима. Такође су представљени начини моделовања кључних елемената микромреже, уз издвајање најзначајнијих параметара који дефинишу њихов рад и интеракцију у оквиру целине. У раду је објашњена и примена симулационог алата *Typhoon HIL*, са посебним освртом на његове предности у пројектовању и тестирању сложених електроенергетских система. Платформа омогућава примену концепта „хардвер у петљи“ (*HIL – Hardware-in-the-Loop*), који представља савремен приступ у верификацији и провери контролних система, симулирајући реалне услове рада и тиме значајно унапређујући процес развоја и поузданости управљачких алгоритама у енергетској електроници.

Транзиција са конвенционалног, централизованог начина производње и дистрибуције електричне енергије у електроенергетском систему је извесна и неминовна. Услед широке палете различитих потрошача електричне енергије, политике самоодрживости, проблема управљања токовима и билансом снага, микромрежа се показује као следећи степен у технолошком развоју, зато што минимизује губитке у преносним средњенапонским водовима, тј. произведена електрична енергија се локално дистрибуира и троши. Иако је циљ постићи енергетску стабилност оваквих система, у пракси се показало да и није баш једноставан задатак. Разлог томе је што обновљиви извори енергије и системи за складиштење електричне енергије у себи садрже претвараче, који су сами по себи комплексни и њима се мора управљати на специфичан начин. Овакво усложњавање електроенергетског система, захтева од пројектаната да узму у обзир обиље техно-економских аспеката оваког система при пројектовању.

Симулацијом над датом микромрежом се може закључити да би било смислено инсталирати одређене соларне капацитете, док је фактор искоришћења ветроелектране изузетно мали, због малих вредности брзине ветра, те да би било потребно додатно испитати исплативост такве инвестиције. Такође, ако се обрати пажња на систем за складиштење енергије, инсталација оваквих капацитета би унела велике инвестиционе трошкове, али би омогућила лакше балансирање микромреже и напајање локалних потрошача са истом тачком прикључења на средњенапонску мрежу. Требало би се такође узети у обзир могућност учествовања произведене енергије на међународној берзи за трговину електричном енергијом, при чему би се ускладиштени капацит могао пласирати на међународно тржиште у периодима највиших цена MWh.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] G.T. Heydt, The next generation of power distribution systems, IEEE Trans.Smart Grid 1 (3) (2010) 225–235, <http://dx.doi.org/10.1109/Tsg.2010.2080328>
- [2] Dalmo C. Silva Júnior, Control of a multi-functional inverter in an AC microgrid – Real-time simulation with control hardware in the loop, Electric Power Systems Research 172 (2019) 201–212, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.016>
- [3] <https://www.typhoon-hil.com/solutions/microgrids/>
- [4] T. Porsinger, P. Janik, Z. Leonowicz, R. Gono, Modelling and Optimization in Microgrids. Energies 2017 10(4) 523, <https://doi.org/10.3390/en10040523>

- [5] G. Chicco, P. Mancarella, Distributed multi-generation: A comprehensive view, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2009) 13(3):535-551, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.014>