

DOI: [10.46793/CIGRE37.C4.08](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C4.08)**C4.08****ИЗОЛОВАНИ РАД МИКРОМРЕЖЕ СА ВИШЕСТРУКИМ СКЛАДИШТИМА
ЕНЕРГИЈЕ****ISOLATED WORK OF MULTI-ENERGY CARRIER NETWORK****Соња Кнежевић, Дарко Шошић***

Кратак садржај: Све већом применом обновљивих извора енергије и децентрализованих принципа у електроенергетским системима, појавили су се одређени проблеми у погледу компензације потрошачких потреба за електричном енергијом. Због интермитентне производње енергије из обновљивих извора, они не могу да реагују на потражњу потрошача, што доводи до вишкова енергије у одређеним интервалима када она није потребна. Да би се премостио овај временски јаз између производње и потрошње, потребно је применити складиштење енергије. У овом раду, складишта енергије су представљена кроз складиштење водоника, који се добија електролизом помоћу електричне енергије произведене у периоду смањене потрошње. Складиштени водоник ће касније бити кориштен у горивим ћелијама за производњу електричне енергије у периодима максималне потрошње. Контрола система се врши на основу скупа правила и услова који морају бити испуњени за ефикасан рад таквог система. Представљени су принципи електролизе и модели појединачних елемената који се налазе у овом систему. Симулација рада система заснива се на једночасовним мерењима производње ветроелектрана, соларних панела и потрошње домаћинства на територији Србије. Анализа је извршена за временски хоризонт од једне седмице како би се уочио образац понашања таквог система.

Кључне речи: *складишта водоника, електролизер, обновљива енергија, гориве ћелије, електрична возила, микромрежа.*

Abstract: With the increasing use of renewable energy sources and decentralized power systems, certain challenges have emerged in meeting consumers' electrical energy demands. The intermittent nature of renewable energy generation means that it cannot always align with consumers' needs, resulting in periods of excess energy production when it is not required. To bridge this gap between production and consumption, energy storage systems are necessary. This paper defines the work of an isolated microgrid, which consists of renewable sources (wind and PV) for energy production, households with electric vehicles as consumers, and a combined storage system. This storage system is made from batteries, hydrogen storage, and a control system that defines the best use of the storage.

*Sonja Knežević, University of Belgrade, sonjaknezevic98@gmail.com

Darko Šošić, University of Belgrade- School of Electrical Engineering, sosic@etf.rs

Stored energy is utilized through fuel cells to generate electricity for consumption when renewable sources cannot meet the demand. This paper presents the principles of electrolysis and models of individual elements within such a system, as well as the definition and principle of control of the system functionality based on rules and conditions. The proposed control system aims to increase the energy storage lifecycle by deciding when and how to utilize which type of storage and define a self-sufficient microgrid based on renewable sources of production. An economic analysis of the storage part of the system was carried out in which the IEBelized cost of energy stored and the NPC of the storage systems are calculated. A simulation of the system's operation is conducted using one-hour measurements of wind turbines, solar panels, and household consumption in Serbia. To analyze the system's behavior, a one-week time horizon is considered.

Key words: *Hydrogen storages, Electrolyzer, Renewable energy, Fuel cells, EB, Microgrids*

1 УВОД

Са све већим трошковима фосилних горива и еколошким проблемима [1] повезаним са традиционалним изворима енергије, многе земље су се окренуле ка производњи обновљиве енергије. Владе често подстичу коришћење обновљивих извора енергије како би се постигли циљеви нето-нулте емисије до 2050. године [2,3]. Међутим, укључивање обновљивих извора у електроенергетски систем доноси одређене изазове. Често нарушава баланс потрошње и производње услед интермитентности и неизвесности обновљивих извора енергије [4]. Количина енергије коју производе ветропаркови директно зависи од амбијенталних услова и брзине ветра, који су по својој природи непредвидиви. Слично томе, енергија коју производе соларни панели зависи од доступности употребљивих светлосних зрака, на које утичу фактори као што су доба дана, облачност и положај панела. Како се ова врста производње не може лако предвидети или користити на захтев, балансирање таквог електроенергетског система постаје сложено.

Традиционално, електроенергетски систем је био балансиран на основу принципа да производња прати потрошачке потребе. Међутим, овај приступ је теже одржати када извор енергије не може да обезбеди енергију на захтев.

У овом раду анализиран је независан систем који функционише у острвском режиму. Циљ је да се максимално искористи сва енергија произведена из обновљивих извора, без обзира на тренутне потребе потрошње. Сваки вишак енергије који не може бити одмах потрошен складишти се у систему за складиштење енергије. Ова складиштена енергија може се затим користити у тренуцима када потражња за енергијом премашује капацитет производње.

Овај рад даље истражује принципе складиштења водоника и могућу интеграцију електричних возила у кућне системе. Концепт подразумева коришћење вишка енергије из обновљивих извора за електролизу воде, чиме се добија водоник који се складишти у резервоарима за будућу употребу.

Принцип добијања водоника из обновљивих извора анализиран је у више радова [5,6], у којима су разматрани различити типови електролизера [7–9] и приказани су позитивни резултати.

Да би било могуће складиштење и функционално коришћење водоника, спроведена су обимна истраживања о принципима његовог настанка, складиштења и дизајна елемената који подржавају развој ове технологије [7]. Начини производње водоника могу имати различите еколошке утицаје, у зависности од примењених принципа. Најчистији облик водоника добија се из обновљивих извора енергије, јер има минималне негативне ефекте [10,11]. Један од приступа производњи водоника из обновљивих извора, конкретно из фотонапонских (ФН) панела током периода вишка соларне енергије, разматран је у [9].

Принцип коришћења енергије из водоника нуди неколико предности, укључујући високу енергетску ефикасност, еколошке и друштвене користи, као и повећану економску конкурентност у односу на друге изворе енергије [12,13].

Приликом имплементације система за производњу водоника из обновљивих извора, као што су ФН панели и електролизери, од кључне је важности уређај који контролише њихов рад. Овај уређај игра важну улогу у одређивању периода када се вишак енергије усмерава ка електролизеру ради производње и складиштења водоника, уместо да се троши у мрежи [14].

Стварање таквог управљачког принципа подразумева дефинисање скупа услова под којима сваки елемент ради најефикасније, а затим његову имплементацију у реални систем. Постоји неколико метода за развој принципа управљања. У овом раду, у систем је имплементирана програмерска процедура за праћење тренутног нивоа складиштене енергије. На основу ових информација и унапред дефинисаних услова, систем шаље сигнале одговарајућим елементима, обезбеђујући оптималан рад и контролу процеса производње и складиштења енергије [15].

У овом раду анализиран је дистрибутивни систем који користи енергију из ветротурбина, соларних панела и електролизера. Циљ је искористити вишак енергије из обновљивих извора за добијање и складиштење водоника, као и складиштење у појединачним батеријама и батеријама електричних возила (ЕВ). Фокус потрошње у анализираном подручју су домаћинства. Потребни подаци за анализу добијени су мерењима спроведеним у Републици Србији. Мерења су обезбеђена од стране локалног оператера система.

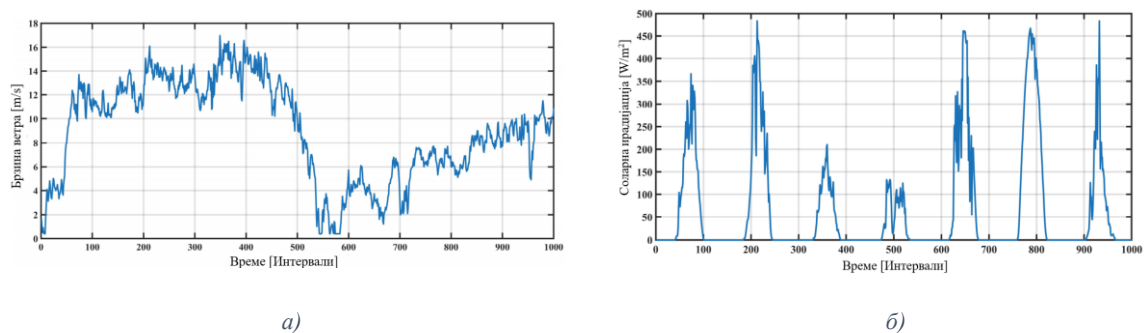
2 ОБНОВЉИВИ ИЗВОРИ И СКЛАДИШТА ЕНЕРГИЈЕ

2.1 Интермитентност обновљивих извора енергије

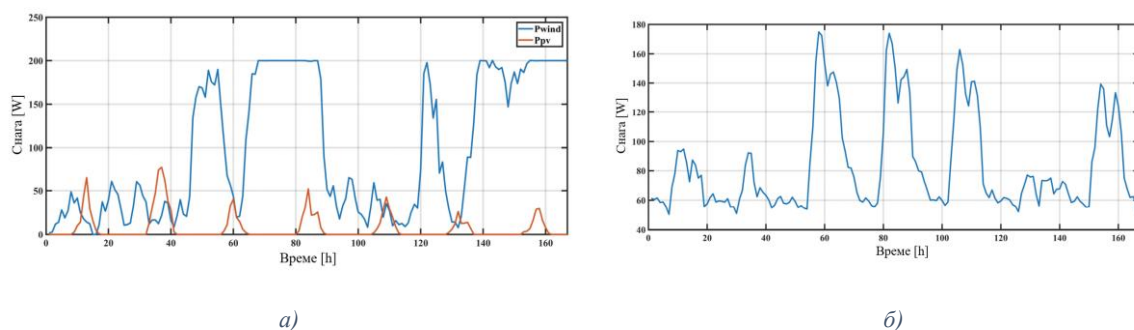
Обновљиви извори енергије су привукли значајну пажњу као напредујући сегмент електроенергетских система. Због еколошких изазова и све већих цена фосилних горива, они представљају адекватно решење за енергетску кризу. Поред тога, последњих година постали су економски исплативији, а многе земље пружају финансијске подстицаје за њихов развој како би се суочиле са глобалним еколошким проблемима.

Међутим, интермитентна природа производње обновљиве енергије представља велики изазов за постојеће енергетске системе. Потрошачи можда неће добити енергију онда када им је потребна, јер она зависи од примарних извора као што су ветар и сунчева радијација.

На слици 1 приказане су промене брзине ветра и сунчевог зрачења измерене на подручју Србије, које директно утичу на количину енергије коју производе ветротурбине и соларни панели. Слика 3 приказује варијације у производњи обновљиве енергије и потрошњи током недеље. На слици 3-а) види се да је производња из ветротурбина променљива, док соларна ирадијација следи дневни сунчев циклус. Са слике 3-б) види се да потрошња електричне енергије која свој пик има тек увече, док је пик производње у току дана. Ово указује на потребу за складиштењем енергије или управљањем оптерећења како се уочава значајан јаз између максималне потражње и максималне производње. Како се ова енергија производи у неконтролисаним тренуцима, често је није могуће одмах искористити или испоручити потрошачима. Складиштење енергије представља могуће решење ових изазова, јер омогућава да се вишак енергије акумулира у мрежи и користи онда када је потребан.



Слика 1: а) Брзина ветра; б) Соларна ирадијација



Слика 2: За недељу дана: а) Производња из обновљивих извора; б) Потрошња домаћинства

2.2 Складишта енергије

Развијене су различите технологије за складиштење енергије, свака са својим предностима и недостацима. Системи складиштења енергије у замајцима и суперпроводним магнетним системима имају изузетно брзо време одзива у опсегу од неколико милисекунди и дуг животни век са великим бројем циклуса пуњења и пражњења. Међутим, њихова цена по јединици складиштене енергије је висока, због чега су најисплативији за мање количине енергије [16,17].

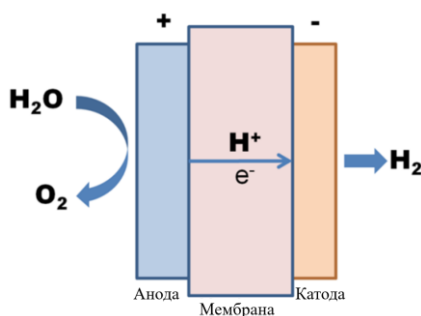
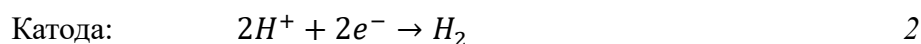
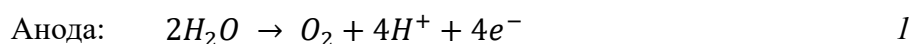
С друге стране, батерије и складиштење водоника имају ниже трошкове по јединици складиштене енергије, што их чини погодним за веће количине. Ипак, њихово време одзива је дуже. Количина складиштене енергије зависи од капацитета складишног система [18].

Овај рад анализира принцип складиштења водоника. Вишак енергије из обновљивих извора користи се за производњу водоника путем електролизе, док се батерије користе за краткорочно складиштење, допуњујући нестабилност обновљивих извора.

3 ПРОИЗВОДЊА ВОДНИКА ЕЛЕКТРОЛИЗЕРОМ

Електролиза је процес који користи електричну енергију за разлагање молекула воде на водоник и кисеоник. Код производње водоника, електролизери користе једносмерну струју из обновљивих извора, а као једини нуспроизвод настаје чист кисеоник [19–20]. Постоје четири типа електролизе на основу електролита, услова рада и јонских агенаса. У овом раду је анализирана ПЕМ електролиза воде [21]. Овај метод се сматра једним од најпогоднијих за конверзију обновљиве енергије у чист водоник, због чега се активно развија за примену у енергетским системима [22].

На слици 5 приказан је принцип рада ПЕМ електролизера [6]. Када се примени електрична струја, молекули воде се разлажу на атом кисеоника, протоне и електроне. Електрони и протони се крећу ка катоди, док кисеоник остаје на аноди. Протон-проводна мембрана омогућава пренос енергије из спољних извора (напон електролизера U_{el}), неопходне за ову реакцију. На електродама долази до рекомбинације молекула, што доводи до формирања водоника на катоди и кисеоника на аноди.



Слика 3: Принцип ПЕМ електролизе

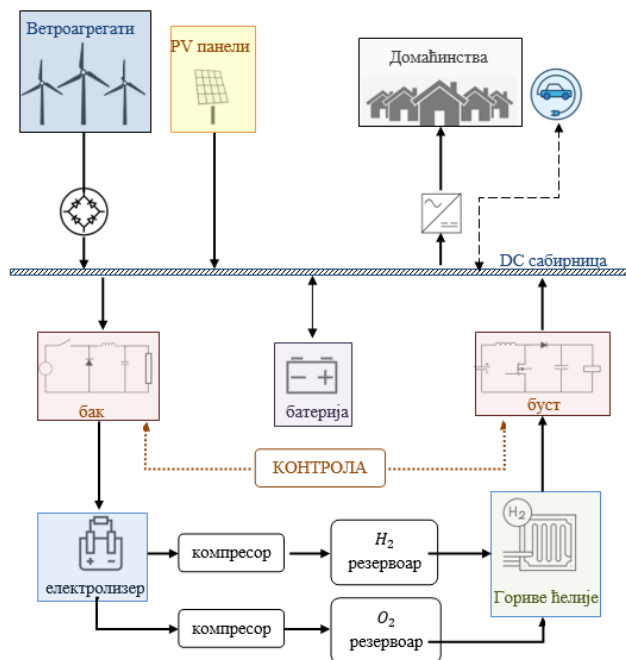
За рад електролизера потребно је применити једнофазни напон на аноду и катоду, који представља збир напона електрода и губитака, укључујући активационе, јонске и концентрационе губитке. Кључно је да овај напон буде обезбеђен из обновљивих извора енергије како би електролизер радио ефикасно [23].

$$U_{el} = U_{rev} + \eta_{act} + \eta_{\Omega} + \eta_{conc}, \quad 3$$

Где су U_{rev} —напон између електрода; η_{act} —активациони губици; η_{Ω} —јонски губици; η_{conc} —концентрациони губици.

4 ПРИНЦИП РАДА СИСТЕМА

Анализирани систем је пројектован за интеграцију обновљивих извора енергије, посебно ветротурбина и соларних панела. Вишак електричне енергије из ових извора усмерава се ка складиштима. Основни принцип система приказан је на слици 6.



Слика 4: Модел система

Складиштење енергије у виду водоника је исплативије за веће количине енергије. Више температуре, које се постижу при дужем складиштењу већих количина енергије, побољшавају ефикасност електролизера. Међутим, овакав систем није економичан за мале и тренутне размене енергије са мрежом. У случају складиштења већих количина енергије, произведени водоник се транспортује у резервоаре за водоник.

Када је потребно, овај складиштени водоник може се користити за производњу електричне енергије за потрошаче у тренуцима када обновљиви извори не задовољавају потребе. Коришћењем водоника као носиоца енергије систем превазилази разлике између производње обновљиве енергије и потрошње, омогућавајући стабилно и континуирано снабдевање [24,25].

Батерије или електрична возила (ЕВ) користе се за краткорочно складиштење мањих количина енергије. Како велики број циклуса пуњења и пражњења смањује век трајања батерија, циљ је да се овај процес минимизује. Батерије се штеде смањивањем периода њихове употребе, уз коришћење ЕВ током ноћних сати. Размена енергије са ЕВ се врши када су возила повезана на пуњаче у домаћинствима [26, 27].

За детаљније моделовање неопходно је размотрити конверзију енергије из једног облика у други. Циљ овог рада је интегрисано функционисање извора енергије, потрошача и складишта, који су повезани преко једносмерне (DC) сабирнице. Графички приказ система дат је на слици 6.

Ветротурбина је повезана са једносмерном сабирницом преко исправљача. Енергија се узима са једносмерне сабирнице преко инвертера за потрошњу и преко конвертера спуштача напона за електролизер. Батерије за привремено складиштење енергије повезане су директно на једносмерну сабирницу. Енергија из горивих ћелија доводи се до једносмерне сабирнице преко конвертера дизача напона. Целокупан систем је под управљањем глобалне контроле [28].

5 МОДЕЛОВАЊЕ ЕЛЕМЕНАТА СИСТЕМА

Сви елементи су појединачно моделовани ради тачне процене тока електричне енергије. Јединице су груписане са својим конвертерима. Контрола утиче на конвертере при испоруци енергије из складишта у једносмерну сабирницу и при преузимању енергије за електролизу. Улазни подаци система су једносатна мерења производње ветротурбина, соларних панела, потрошње, као и подаци о елементима мреже и њиховом функционисању. На основу ових вредности и дефинисаних правила врши се подешавање контроле.

5.1 Електролизер и бак претварач

Пошто су динамика конвертера и њихово време одзива знатно бржи у односу на остале делове система, они се посматрају као идеални извор напона на који је повезан електролизер. Излазна снага електролизера P_{El} је снага која улази у бак претварач P_{Bu} , умањена за коефицијент ефикасности η_{Bu} .

$$P_{el} = \eta_{Bu} \cdot P_{Bu} \quad 4$$

$$U_{El} = \frac{P_{El}}{I_{El}} \quad 5$$

$$U_{El} = U_{El,0} + C_{1El} \cdot T_{El}(t) + C_{2El} \cdot \ln\left(\frac{I_{El}(t)}{I_{El,0}}\right) + \frac{R_{El} \cdot I_{El}(t)}{T_{El}(t)} \quad 6$$

Напон потребан за електролизу изражава се као однос снаге електролизера и струје коју прима из конвертера [31]. Једначина (6) описује зависност напона од струје и температуре. Коефицијенти $U_{El,0}$, C_{1El} , C_{2El} , R_{El} и $I_{El,0}$ су експериментално дефинисани за електролизер, а T_{El} представља његову радну температуру. Из ових једначина добија се веза између излазне снаге конвертера и струје електролизе, чиме се дефинише степен производње електролизера.

$$\dot{V}_{El} = N_{Cell,El} \cdot \frac{\eta_{l,El} \cdot I_{El}(t)}{C_{H_2}} \quad 7$$

Где су: $N_{Cell,El}$ – број ћелија; $\eta_{l,El}$ – фактор искориштења електрлизера; C_{H_2} – коефицијент конверзије

5.2 Батерије и ЕВ

Батерије повезане на DC сабирнице и батерије електричних возила (ЕВ) симулиране су истим принципом рада. Димензиониране су на исти начин, а исти принцип конверзије енергије примењује се у овом раду. Батерије су повезане паралелно са DC сабирницама, а струја која тече кроз батерију дата је следећом једначином.

$$I_B(t) = I_{PV}(t) + I_{Wind}(t) + I_{B0}(t) - I_{Bu}(t) - I_{Load}(t) \quad 8$$

где су I_{PV} – струја из соларних панела; I_{Wind} – струја из ветроагрегата; I_{Bu} – струја ка бак претварачу; I_{B0} – струја ка буст претварачу; I_{Load} – струја система.

$$U_B t = 1 + \alpha \cdot t \cdot U_{B,0} \cdot t + R_i \cdot I_B t + K_i \cdot Q_R t, \quad 9$$

$$SOC_B = 100 \cdot \frac{E_B}{E_{B,max}} \quad 10$$

Где је α – фреквенција пражњења; $U_{B,0}$ – напон отвореног кола за $t = 0$; E_B – енергија батерије.

5.3 Гориве ћелије и буст претварач

Динамика конвертера је знатно бржа од осталих делова система, као у случају спуштача напона. Они се представљају као идеални извори енергије чији излаз зависи од ефикасности конвертера. Његова улога је пренос енергије до DC сабирнице, а улазни напон добија од гориве ћелије, што се изражава кроз једначину (13).

$$P_{Bo} = \eta_{Bo} \cdot P_{FC} \quad 11$$

$$U_{FC} = \frac{P_{FC}}{I_{FC}} \quad 12$$

$$U_{FC} = U_{FC,0} + C_{1FC} \cdot T_{FC}(t) + C_{2FC} \cdot \ln\left(\frac{I_{FC}(t)}{I_{FC,0}}\right) + \frac{R_{FC} \cdot I_{FC}(t)}{T_{FC}(t)} \quad 13$$

У једначини (13) приказана је зависност напона од струје и температуре. Коефицијенти $U_{FC,0}$, C_{1FC} , C_{2FC} , R_{FC} , и $I_{FC,0}$ су експериментално дефинисани за гориву ћелију, а T_{FC} је њена радна температура. Степен производње гориве ћелије изражава се кроз једначину (14).

$$\dot{V}_{FC} = N_{Cell,FC} \cdot \frac{\eta_{I,FC} \cdot I_{FC}(t)}{C_{H_2}} \quad 14$$

где су $N_{Cell,FC}$ – број ћелија; $\eta_{I,FC}$ – фактор искориштења горивих ћелија; C_{H_2} – коефицијент конверзије

5.4 Складиште водоника

Енергија складиштена у водонику може се моделовати једначином (15), док је проценат енергије у водонику дат једначином (17) кроз HL [%].

$$E_{H_2} = E_{H_2,0} + \int (P_{El} - P_{FC}) dt \quad 15$$

$$E_{H_2} = E_{H_2,0} + \frac{1}{s} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{El} \cdot \Delta H}{V_T} - \frac{\dot{V}_{FC} \cdot \Delta H}{V_T} \right) \quad 16$$

$$HL = 100 \cdot \frac{E_{H_2}}{E_{H_2, max}}$$

17

где су E_{H_2} – иницијална енергије у водороду; P_{El} – снага електролизера; P_{FC} – снага апсорбована у гориве ћелије.

5.5 Контрола система

Организација рада целокупног система је сложен проблем. Једноставно усмеравање вишка енергије у складиште није довољно. Контролни систем мора одредити да ли ће енергија бити послата у складиште водоника или у батерије, у зависности од количине енергије. Складиштење у виду водоника није ефикасно за мање количине енергије. Због тога се енергија шаље у складиште водоника само ако је количина довољно велика да оправда покретање електролизера. У супротном, енергија се складишти у батеријама.

Исти принцип важи у супротном смеру. Ако је потражња мала и не може се покрити производњом, енергија се узима из батерија. Ако је потражња велика, енергија се преузима из горивих ћелија.

Због тога су батерије укључене као привремено складиште за мање количине енергије, уз складиштење у водонику. Приликом избора методе складиштења мора се узети у обзир ефикасност конверзије енергије из електричне у водоничну и обрнуто.

Рационално коришћење батерија је такође важно. Не треба их празнити испод одређене границе, а чести циклуси пуњења и пражњења треба да се избегну како би се очувао њихов век трајања. Због тога контролни систем мора пратити стање складиштене енергије и управљати њиховом употребом.

Улазни подаци за контролни систем су тренутно стање мреже, односно разлика између производње и потрошње, ток енергије и стање батерија, које је дефинисано вредношћу стања напуњености, *SOC*. Ови подаци омогућавају доношење одлука у систему контроле.

H₂ граница представља унапред дефинисану границу енергије при којој се електролизери и гориве ћелије активирају. Његова вредност је одређена капацитетом електролизера, који је одабран за конкретан енергетски систем. У овом истраживању, ова вредност је фиксна и износи 50 kW. Ако је потребна количина складиштене енергије мања од ове границе, активирају се батерије и ЕВ.

$$FLOW = P_{Wind} + P_{PV} - P_{opt}$$

18

Информације неопходне за контролу система:

1. Ток енергије: дефинише да ли постоји вишак или мањак енергије за потрошаче
 - А) **ТОК > 0**: постоји вишак енергије која треба да се складишти; енергија иде ка електролизеру, батеријама или ЕВ.
 - Б) **ТОК < 0**: постоји мањак енергије која се узима из горивих ћелија, батерија или ЕВ.
2. Количина вишка енергије:

А) **ТОК > H₂ граница:** довољно енергије да се пали електролизер

Б) **ТОК < H₂ граница:** мања количина вишка енергије; складишти се у батеријама или ЕВ

3. Доба дана:

А) **18h - 8h:** ЕВ су на пуњачима, користе се за складишта мање количине енергије

Б) **8h - 18h:** у току дана се за складиштење мање количине енергије користе батерије

Жељено понашање овог система може се лако дефинисати кроз правила, што нуди бројне предности за управљање. Коришћењем овакве контроле засноване на правилима, цео спектар улазних параметара може се ефикасно укључити без повећања сложености управљања [30]. Овај облик контроле има одређене предности у односу на алгоритме машинског учења, јер не захтева велику количину историјских података, који можда нису лако доступни за поједине технологије и системе у којима су сви наведени елементи имплементирани.

6 РЕЗУЛТАТИ

6.1 Ток снага и складишта

Резултати симулације приказани су у графичком облику како би се могло пратити активирање различитих врста складишта енергије и количина снаге размењене између сваког складишта понаособ и читавог система. Подаци мерења коришћени у овој анализи за снагу ветра, сунца и потрошњу приказани су у графицима на сликама 1–2. Параметри елемената система дати су у Табели 1.

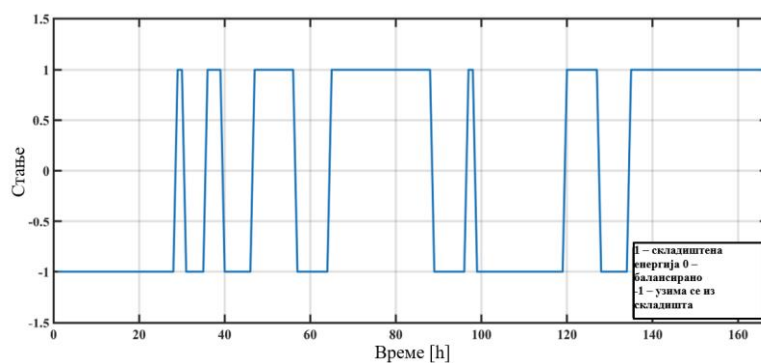
Табела 1: Стање система у току недеље

Електролизер				Гориве ћелије			
$U_{El,0}$ [V]	22.25	R_{1E} [°C]	-3.3198	$U_{FC,0}$ [V]	33.18	R_{FC} [°C]	-2.04
C_{1El} [V/°C]	-0.1765	C_{2El} [V]	5.5015	C_{1FC} [V/°C]	-0.013	C_{2FC} [V]	-1.57
$I_{El,0}$ [A]	0.1341	$N_{Cell,El}$	24	$I_{FC,0}$ [A]	8.798	$N_{Cell,FC}$	35
$\eta_{I,El}$	0.7	C_{H_2} [Ah/L]	8604	$\eta_{I,FC}$	0.45	C_{H_2} [Ah/L]	8604
η_{Bu}	0.95	-	-	η_{Bo}	0.95	-	-
Батерије				ЕВ			
α [Hz]	0	R_i [Ω]	0.076	α_{EV} [Hz]	0	$R_{i,EV}$ [Ω]	0.076
$U_{B,0}$ [V]	48	K_i	0	$U_{B,0,EV}$ [V]	48	$K_{i,EV}$	0
Складиште Водоника							
ΔH [kJ/mol]	286			V_T [L/mol]	22.4		

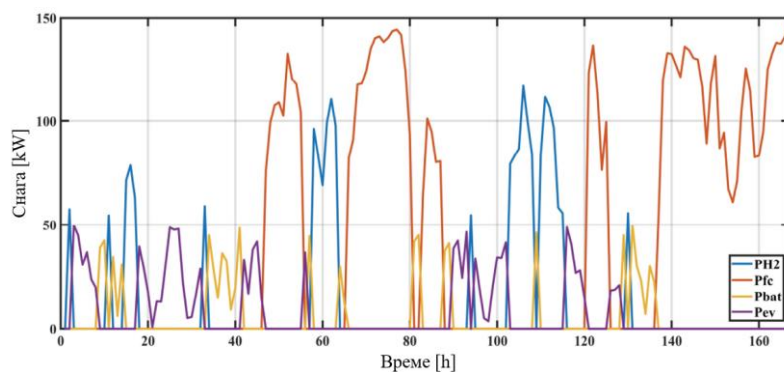
Слика 5 приказује временске варијације захтева система. Позитивне вредности указују на периоде када је постојао вишак произведене енергије која је требало да буде складиштена, док негативне вредности означавају периоде када је енергија требало да буде преузета из складишта. Слика 6 илуструје периоде у којима је коришћена свака врста складиштења електричне енергије. Вредности снаге су позитивне и представљају количину снаге размењене са појединачним складиштима. Мање количине енергије се размењују са електричним возилима (ЕВ) током ноћи (љубичаста), док се током дана размењују са батеријама (жута). Електролизери (плава) и гориве ћелије (црвена) раде и током дана и ноћи, јер нису ограничени временским условима.

Улазни подаци који се дају систему управљања укључују само тренутно стање мреже. Разматрају се следеће две вредности: разлика између производње и потрошње (ток енергије), што је изражено у једначини (15), и стање батерија, које је дефинисано вредношћу стања напуњености, *SOC*. Ови улази усмеравају процес доношења одлука у контролном систему.

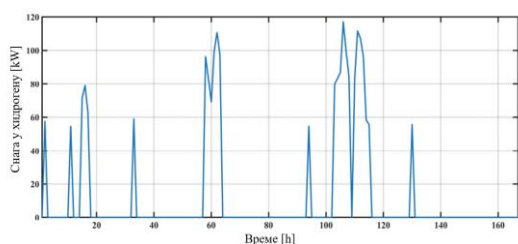
Резултати приказани на сликама 5–7 показују снагу појединачних елемената размењену са системом у току једне недеље. Перавац тока енергије јасно је означен за снагу складиштену у виду водоника и снагу генерисану активирањем горивих ћелија. У случају електролизера, енергија тече из система у складиште водоника, док за гориве ћелије енергија тече из складишта у систем када постоји недостатак енергије.



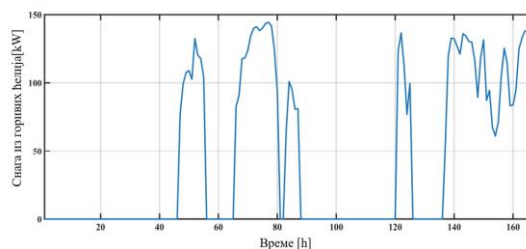
Слика 5: Стање система у току недеље



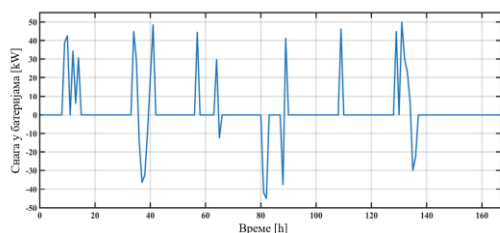
Слика 6: Активација различитих врста складиштења у току недеље



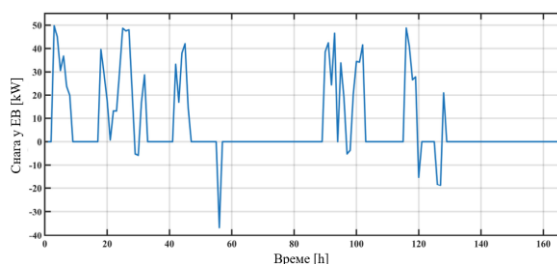
а) Снага складиштена у виду хидрогена у току недеље



б) Снага узета из горивих ћелија у току недеље



в) Снага размењена с батеријама у току недеље

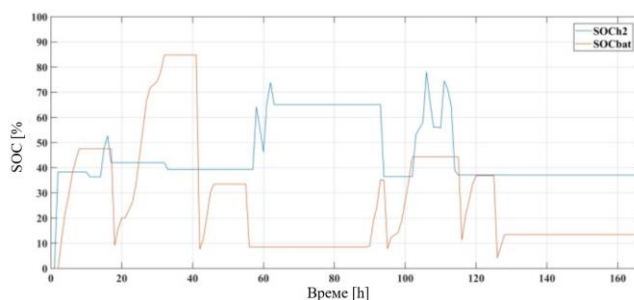


г) Снага размењена с ЕВ у току недеље

Слика 7: Снага за недељу дана

За батерије и електрична возила (ЕВ), енергија може тећи у оба смера, што се уочава кроз негативне вредности снаге. Негативан знак указује на то да се енергија доводи у складиште, док позитиван знак означава да се енергија из складишта користи за напајање потрошача. Ови резултати пружају драгоцен увид у динамику размене енергије и употребу различитих елемената складиштења у оквиру система.

На слици 8 приказано је процентуално стање напуњености складишта водоника и батерија. Ова графичка репрезентација омогућава праћење варијација у стању напуњености током рада система, као и процентуални однос ангажовања између две врсте складиштења.



Слика 8: SOC батерија и ЕВ

Како се вишак енергије у систему јавља чешће у мањим количинама, батерије се користе више. Ово доводи до већих динамичких промена у њиховом стању напуњености. У овом конкретном систему, батерије су биле ангажоване у већој мери у односу на свој капацитет, за разлику од складишта водоника. Међутим, већа количина енергије је била складиштена у виду водоника, што је у складу са принципом оваквог начина складиштења енергије.

Ова запажања истичу динамичко понашање система и различиту употребу врста складиштења у зависности од потреба за енергијом и њене доступности.

7 ЗАКЉУЧАК

Овај рад се бави принципом функционисања изолованог система који има сопствену производњу из обновљивих извора енергије, потрошњу која се огледа у снабдевању домаћинстава и различите типове складиштења енергије који су одговорни за одржавање стабилности такве мреже. Посматрана је снага појединачних складишта и однос њиховог ангажовања у раду читавог система. Такође, анализирана је способност независног и функционалног рада оваквог система, упркос великом броју различитих врста непредвидивих извора енергије и њихових складишта.

Очекујуће динамичко понашање батерија је потврђено. Како би се олакшао рад батерија и продужио њихов век као додатног складишта, током ноћи су коришћена доступна електрична возила. Успешно су примењена правила којима се веће количине енергије складиште у виду водоника.

У оваквом систему, међусобна подршка елемената представља најзначајнију предност, која омогућава значајан напредак у функционисању овог типа мреже. Приказана је имплементација нових технологија и идеја, попут складиштења водоника, са циљем ублажавања интермитентности обновљивих извора и балансирања микромреже, која не мора да се ослања на већу дистрибутивну мрежу ради одржавања своје стабилности. На основу свих добијених резултата, закључено је да би хибридни систем мрежа/горива ћелија/соларни панели/електролизер могао бити перспективно решење у земљама у развоју.

У будућем развоју оваквих система планирано је унапређење технологије у вези са формирањем управљања системом, детаљније посматрање појединачних елемената или имплементација додатних извора енергије и различитих типова потрошача. Како би се остварила напреднија контрола система, могуће је коришћење вештачких неутралних мрежа за предвиђање производње и потрошње енергије, што би омогућило да системи буду дефинисани унапред и да избегну изазове планирања у реалном времену.

8 LITERATURA

- [1] IEA. Global Energy REBiew: CO2 Emissions in 2021. 2021. Available online: <https://www.iea.org/reports/global-energy-rEBiewco2-emissions-in-2021-2>
- [2] IEA. World Energy Outlook 2020. 2020. Available online: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- [3] IEA. Energy Policy REBiew—Denmark 2023. 2023. Available online: <https://www.iea.org/reports/denmark-2023>
- [4] Kayacık, S.E.; Schrottenboer, A.H.; Ursavas, E.; Vis, I.F.A. Towards low-carbon power networks: Optimal location and sizing of renewable energy sources and hydrogen storage. Sustain. Energy Grids Netw. 2024, 38, 101394.
- [5] Dimitrios, A.; Peter, E. The past, present and potential of hydrogen as a multifunctional storage application for wind power. Renew. Sustain. Energy REB. 2019, 112, 917–929.

- [6] Kumar, S.S.; Himabindu, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis—A rEBiew. *Mater. Sci. Energy Technol.* 2019, 2, 442–454.
- [7] Basile, A.; Dalena, F.; Tong, J.; Veziroğlu, T.N. *Hydrogen Production Separation and Purification for Energy*; Institution of Engineering and Technology (IET): London, UK, 2017.
- [8] Strunz, K.; Brock, E.K. Stochastic Energy Source Access Management: Infrastructure-integrative modular plant for sustainable hydrogen-electric co-generation. *Int. J. Hydrogen Energy* 2006, 31, 1129–1141.
- [9] Ribeiro, P.F.; Johnson, B.K.; Crow, M.L.; Arsoy, A.; Liu, Y. Energy storage systems for advanced power applications. *Proc. IEEE* 2001, 89, 1744–1756
- [10] Rasul, M.G.; Hazrat, M.A.; Sattar, M.A.; Jahirul, M.I.; Shearer, M.J. The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. *Energy Convers. Manag.* 2022, 272, 116326.
- [11] Li, X.; Machiel, M. Value of power-to-gas as a flexibility option in integrated electricity and hydrogen markets. *Appl. Energy* 2021, 304, 117863
- [12] Schrotenboer, A.; Veenstra, A.T.; het Broek, M.A.J.U.; Ursavas, E. A green hydrogen energy system-optimal control strategies for integrated hydrogen storage and power generation with wind energy. *Renew. Sustain. Energy REB.* 2022, 168, 112744.
- [13] Karayel, G.K.; Javani, N.; Dincer, I. A comprehensive assessment of energy storage options for green hydrogen. *Energy Convers. Manag.* 2023, 291, 117311.
- [14] Singh, P.; Lather, J.S. Artificial neural network-based dynamic power management of a DC microgrid: A hardware-in-loop real-time verification. *Int. J. Ambient. Energy* 2022, 43, 1730–1738
- [15] Wang, J.; Li, H.; Li, Q. A hierarchical control strategy for microgrids with renewable energy sources. *Electr. Power Syst. Res.* 2016, 131, 128–139
- [16] Barton, J.P.; Infield, D.G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2004, 19, 441–448.
- [17] European Association for Storage of Energy. Available online: <https://ease-storage.eu/>
- [18] Bessarabov, D.; Millet, P.; Pollet, B.G. *PEM Water Electrolysis*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2018.
- [19] Barbir, F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Sol. Energy* 2005, 78, 661–669.
- [20] Ulleberg, Ø. Modeling of advanced electrolyzers: A system simulation approach. *Int. J. Hydrogen Energy* 2003, 28, 21–33

- [21] Hug, W.; Bussmann, H.; Brinner, A. Intermittent operation and operation modeling of an alkaline electrolyzer. *Int. J. Hydrogen Energy* 1993, 18, 973–977.
- [22] Asiaban, S.; Bozalakov, D.; VandEBelde, L. DEBelopment of a dynamic mathematical model of PEM electrolyser for integration into large-scale power systems. *Energy Convers. Manag. X* 2024, 23, 100610
- [23] Deshmukh, S.S.; Boehm, R.F. REBiew of modeling details related to renewably powered hydrogen systems. *Renew. Sustain. Energy REB.* 2008, 12, 2301–2330.
- [24] Bessarabov, D.; Wang, H.; Li, H.; Zhao, N. *PEM Electrolysis for Hydrogen Production: Principles and Applications*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015.
- [25] Bilgen, E. Solar hydrogen from photovoltaic-electrolyzer systems. *Energy Convers. Manag.* 2001, 42, 1047–1058.
- [26] Rahman, M.; Alam, M.A.; StoEB, A.; Pota, H.R. Electric Vehicle and its Battery Technologies: State-of-the-Art, Challenges, and Future Directions. *Energies* 2020, 13, 591.
- [27] Vosen, S.R.; Keller, J.O. Hybrid energy storage systems for stand-alone electric power systems: Optimization of system performance and cost through control strategies. *Int. J. Hydrogen Energy* 1999, 24, 1139–1156
- [28] Bilodeau, A.; Agbossou, K. Control analysis of renewable energy system with hydrogen storage for residential applications. *J. Power Sources* 2006, 162, 757–764.