

Nikolina Čović
Fakultet elektrotehnike i računarstva
nikolina.covic@fer.hr

Ivan Pavić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ivan.pavic@fer.hr

Hrvoje Pandžić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
hrvoje.pandzic@fer.hr

Dražen Balić
Energetski institut Hrvoje Požar
dbalic@eihp.hr

Frano Barbir
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
fbarbir@fesb.hr

Ivan Andročec
HEP d.d.
ivan.androcec@hep.hr

OPTIMALNI POGON SUSTAVA ELEKTROLIZATOR-BATERIJA-FOTONAPON NA TRŽIŠTIMA ENERGIJE I REZERVI

SAŽETAK

Prema Pariškom sporazumu iz 2015. godine nastoji se zadržati prosječni porast temperature na ispod 2°C. Europa prednjači u pokušaju ostvarivanja tog sporazuma, te je kao jedan od ciljeva postavljeno postajanje prvim klimatski neutralnim kontinentom do 2050. godine. Da bi se to ostvarilo potrebno je, između ostalog, smanjiti ispuštanje stakleničkih plinova za 55% do 2030. godine, čemu doprinosi prelazak na obnovljive izvore energije i niskougljične tehnologije. Trenutno u Europskoj Uniji preko 90% plinovitih goriva čine fosilna goriva, te se do 2050. očekuje porast udjela obnovljivih i niskougljičnih plinova (npr. vodika) na preko 60%. Vodik se može koristiti kako bi se dekarbonizirali elektroenergetski i plinski sustav. Uz obnovljivi izvor energije moguće je postaviti elektrolizator te višak proizvedene energije iskoristiti za proizvodnju vodika i kasnije injekciju istog u plinski, odnosno vodikov sustav. Injekcija vodika u plinski sustav ostvaruje se miješanjem vodika s prirodnim plinom. Dok se s druge strane potonja opcija može ostvariti tako da se postojeća plinska mreža iskoristi kao baza za izgradnju vodikove infrastrukture te se tako omogući lakše stvaranje vodikovog sustava. Potreba za vodikovim tržištem također je prepoznata, zbog čega postoje brojna zalaganja na razini Europske Unije za njegovo kreiranje.

Baterijski spremnici posljednjih godina prednjače kao jedna od najčešće spominjanih tehnologija potrebnih za prelazak na sustav s pretežno obnovljivim izvorima energije. Nude razne usluge sustavu (npr. regulacija napona i frekvencije), te omogućuju ostvarivanje prihoda i smanjenja troškova. Iz tog razloga, važno je proučiti zajednički rad sustava elektrolizatora i baterijskog spremnika, kao dvije tehnologije koje se nameću kao potencijalno glavne tehnologije održive budućnosti elektroenergetskog sektora.

U ovom radu prikazan je model koji određuje optimalni pogon sustava koji se sastoji od baterijskog spremnika, elektrolizatora i fotonapona. Za pretpostavljene fiksne iznose instalirane snage baterijskog spremnika i elektrolizatora, detektiraju se novčani tokovi tog sustava proizašli iz trgovanja na dan unaprijed tržištu električne energije, tržištima uravnoteženja, te na plinskom, odnosno vodikovom tržištu.

Ključne riječi: baterijski spremnik energije, elektrolizator, vodik, tržište električne energije, tržišta uravnoteženja

OPTIMAL OPERATION OF THE ELECTROLYZER-BATTERY-PV POWER PLANT PARTICIPATING IN THE ENERGY AND RESERVE MARKETS

ABSTRACT

According to the 2015 Paris Agreement, the aim of signatory countries is to keep the average temperature rise below 2°C. Europe is leading the way in trying to achieve this agreement, and one of the goals is to become the first climate-neutral continent by 2050. To achieve this, it is necessary, among other things, to reduce greenhouse gas emissions by 55% by 2030, which is contributed by the transition to renewable energy sources and low-carbon technologies. Currently, over 90% of gaseous fuels in the European Union are fossil fuels, and by 2050 the share of renewable and low-carbon gases (e.g. hydrogen) is expected to increase to over 60%. Hydrogen can be used to decarbonize both power and gas systems. With a renewable energy source, it is possible to install an electrolyzer and use the excess energy to produce hydrogen and later inject it into the gas or hydrogen system. Hydrogen injection into the gas system is achieved by mixing hydrogen with natural gas. While on the other hand, the latter option can be realized by using the existing gas network as a base for the construction of hydrogen infrastructure and thus enable easier creation of the hydrogen system. The need for a hydrogen market has also been recognized, which is why there are many efforts among the European Union to create one.

In recent years, battery energy storage has been at the forefront as one of the most frequently mentioned technologies needed to move to a system with predominantly renewable energy sources. They offer various services to the system (e.g. voltage and frequency regulation), and enable revenue generation and cost reduction. For this reason, it is important, but also interesting, to study the joint operation of the system consisting of an electrolyzer and battery storage, as two technologies that are emerging as potentially the main technologies for the sustainable future of the electricity sector.

This paper presents a model that analyzes optimal operation of the battery storage, electrolyzer and PV system. For the assumed fixed amounts of the installed capacity of both battery storage and the electrolyzer, the cash flows of that system resulting from day-ahead trading in the electricity market, balancing markets and in the gas and hydrogen markets, respectively, are detected.

Key words: battery energy storage, electrolyzer, hydrogen, electricity market, balancing markets

1. UVOD

Iako je pandemijska 2020. godina rezultirala smanjenjem emisija ugljikovog dioksida, nagli ekonomski oporavak u narednoj godini doveo je do najvećeg godišnjeg rasta emisija ugljikovog dioksida od 2,1 Gt, premašujući do sad najgoru 2010. godinu [1]. U odnosu na predpandemijsku 2019. godinu, emisije su se povećale približno 180 Mt [1]. Najveći udio u povećanju dogodio se u elektroenergetskom i toplinskom sektoru, što pokazuje veliki potencijal za okretanje prema održivijim procesima i alatima u tim sektorima. Sektori poput zgradarstva ili transporta, zabilježili su manji ili nikakav porast u emisijama u odnosu na predpandemijsko vrijeme, no i dalje značajno negativno utječu na okoliš, zbog čega je i u njima potreban snažni zaokret prema održivim tehnologijama.

Kao ključan faktor za smanjenje emisija ugljikovog dioksida i ispunjavanje cilja klimatski neutralne Europe do 2050. godine, pokazuje se vodik [2]. Trenutno ga se koristi u rafinerijama i u industriji (npr. željeza ili kemijskoj industriji), no moguće ga je primijeniti u preostalim sektorima poput transportnog, elektroenergetskog ili zgradarstva. U transportnom sustavu može se koristiti kao gorivo u punionicama za električna vozila na gorivne ćelije, dok u elektroenergetskom sustavu može služiti kao spremnik energije koji može pružiti fleksibilnost [3] elektroenergetskom sustavu s velikim udjelom obnovljivih izvora energije.

Osim moguće široke primjene, vodik je bitan za zelenu tranziciju zato što je njegovom upotrebom moguće ostvariti potpuno obnovljive procese. U takvim procesima koristio bi se obnovljivi vodik, proizveden elektrolizom vode korištenjem električne energije iz obnovljivih izvora energije. Upravo zato, iako vodik sada zauzima samo 2% udjela u energetskej mješavini, do 2050. predviđa mu se udio od 13-14% [2].

Premda vodik pokazuje velik potencijal, ulogu najistaknutije tehnologije potrebne za prelazak elektroenergetskog sustava na obnovljive izvore energije trenutno zauzimaju baterijski spremnici energije. Oni nude razne primjene sustavu, poput regulacije napona i frekvencije do ostvarivanja financijskih benefita korištenjem u svrhu arbitraže.

S obzirom da se baterijski spremnici i elektrolizatori predstavljaju kao tehnologije koje će u kombinaciji s obnovljivim izvorima energije prednjačiti u tranziciji k obnovljivom i odzivom elektroenergetskom sustavu narednih godina, potrebno je razmotriti njihov zajednički pogon i usluge koje su u stanju pružiti.

U ovom radu analizira se optimalni pogon postrojenja koje se sastoji od elektrolizatora, baterijskog spremnika i fotonaponskih panela s obzirom na signale s dan unaprijed tržišta električne energije i plina i tržišta rezerve i uravnoteženja za ponovnu uspostavu frekvencije (engl. *Automatic Frequency Restoration Reserve*, aFRR). U poglavlju 2 prikazan je model elektrolizatora, a u poglavlju 3 prikazani su modeli nastupa na tržištu dan unaprijed te potom na tržištu rezervi. Oba modela razmotrena su u dva slučaja, ovisno o načinu proizvodnje vodika. Poglavlje 4 sumira rezultate, dok posljednje poglavlje zaključuje rad.

2. MODEL ELEKTROLIZATORA

Proizvodnja vodika iz fosilnih goriva rezultira velikim emisijama ugljikovog dioksida, zbog čega je nužno potražiti alternative. Osim mogućnosti hvatanja ugljikovog dioksida kao nusprodukta proizvodnje iz fosilnih goriva, vodik se može proizvesti korištenjem električne energije elektrolizom vode. Elektroliza vode je postupak u kojem se električna energija koristi za razlaganje molekula vode na molekule kisika i vodika te se taj postupak odvija u uređaju nazvanom elektrolizator. Proizvedeni kisik moguće je ispustiti u atmosferu ili pohraniti u svrhu daljnjeg korištenja u druge svrhe (npr. medicinske), a proizvedeni vodik se također može pohraniti ili odmah koristiti.

Efikasnost elektrolizatora igra veliku ulogu u određivanju perioda rada, potrebne količine električne energije i posljedično operativnih troškova [3]. Ona se definira kao omjer energetske vrijednosti proizvedenog vodika i električne energije utrošene za njegovo dobivanje. Formule (1) – (3) prikazuju matematički model elektrolizatora. Jednadžba (1) definira potrebnu električnu energiju e_t^h u MWh potrebnu za proizvodnju χ_t^h kilograma vodika uz efikasnost η^h . Gornja ogrjevna vrijednost vodika iznosi 39,4 kWh/kg.

$$e_t^h = \frac{\chi_t^h \cdot 39,4}{\eta^h} \quad (1)$$

$$\frac{e_t^h}{\Delta t} \leq P^{ekz} \cdot b_t \quad (2)$$

$$\frac{e_t^h}{\Delta t} \geq 0.1 \cdot P^{ekz} \cdot b_t \quad (3)$$

Efikasnost elektrolizatora mijenja se ovisno o snazi kojom radi, zbog čega je navedenu jednadžbu potrebno linearizirati prije implementacije matematičkog modela. Pretpostavljeno je da pri snazi od 10% nazivne snage efikasnost iznosi 80%, pri nazivnoj snazi 70%, a intervalu između se mijenja linearno [4], [5]. Snaga rada elektrolizatora ne može biti viša od P^{ekz} (2), a elektrolizator mora poštivati tehnički minimum od 10% prema ograničenju (3) [5].

3. RAZMATRANI MODELI SUDJELOVANJA NA TRŽIŠTIMA

Kreiran je matematički model korištenja baterijskog spremnika u svrhu arbitraže na dan unaprijed tržištu električne energije prikazan u poglavlju 3.1 te model u kojem spremnik pruža elektroenergetskom sustavu uslugu aFRR rezerve snage i uravnoteženja prikazan u poglavlju 3.2. U oba modela, uz baterijski

spremnik instaliran je elektrolizator koji procesom elektrolize proizvodi vodik. S obzirom na način prodaje proizvedenog vodika, razlikuju se dodatna dva modela – tržišni i CO₂ model. U slučaju tržišnog modela isključivo je omogućeno trgovanje na tržištu dan unaprijed, a proizvedeni vodik se prodaje po jedinici mase bilo kojem sudioniku tržišta vodika (npr. punionice vozila na vodik). S druge strane, CO₂ model obuhvaća prodaju vodika po jedinici plina te transport cestovnim prijevozom do termoelektrana. Dodatno se pretpostavlja i da je vodik u tom slučaju proizveden iz obnovljivih izvora energije, zbog čega je prilikom proizvodnje električne energije kod termoelektrane moguće izbjeći penale zbog proizvodnje ugljikova dioksida. Konačano, analizirana su 4 modela: tržišni model arbitraže, tržišni model rezerve, CO₂ model arbitraže te CO₂ model rezerve.

3.1. Arbitraža

3.1.1. Tržišni model

Funkcija cilja (4) maksimizira profit postrojenja koji se sastoji od profita od trgovanja na dan unaprijed tržištu Θ^e , prihoda od prodaje vodika π^h , troškova skladištenja i održavanja $\xi^{skl\&odr}$ te troškova vode ξ^{voda} . Profit na dan unaprijed tržištu ovisi o količini prodane energije (ispražnjene iz baterijskog spremnika ili proizvedene iz solarnih panela) i o količini kupljene energije (za potrebe rada elektrolizatora i za punjenje baterijskog spremnika) (5). Prihodi od prodaje vodika ovise o proizvedenoj količini χ_t^h i cijeni po jedinici mase po kojoj se taj vodik prodaje λ_t^{kg} te se računaju prema (6). Troškovi pohrane i održavanja uzeti su u obzir redom kao 3,25% kapitalnog troška, odnosno 3% kapitalnog troška (7). U ovisnosti o količini proizvedenog vodika potrebno je osigurati η^{voda} puta više količine vode po cijeni λ^{voda} što je dodatni trošak (8).

$$\max_{dis_t, ch_t, \chi_t^h} \Theta^e + \pi^h - \xi^{skl\&odr} - \xi^{voda} \quad (4)$$

$$\Theta^e = \sum_t e_t^{DA} \cdot \lambda_t^e \quad (5)$$

$$\pi^h = \sum_t \chi_t^h \cdot \lambda_t^{kg} \quad (6)$$

$$\xi^{skl\&odr} = 3,25\% \cdot \lambda^{spr} \cdot X^h + 3\% \cdot \lambda^{odr} \cdot P^{ekz} \quad (7)$$

$$\xi^{voda} = \sum_t \lambda^{voda} \cdot \chi_t^h \cdot \eta^{voda} / 1000 \quad (8)$$

Navedena funkcija cilja (4) vrijedi uz pridržavanje određenih ograničenja poput ograničenja mrežnog priključka, ograničenja koja definiraju rad baterijskog spremnika, solarnih panela i elektrolizatora, koja su prikazana u poglavlju 2.

3.1.2. CO₂ model

Prodavanje vodika po cijeni plina uz cestovni transport do termoelektrane prikazan je CO₂ modelom čija je funkcija cilja (9). U odnosu na tržišni, CO₂ model uzima u obzir i uštedu zbog izbjegavanja penala zbog emisija CO₂ korištenjem vodika (10), umjesto određene količine prirodnog plina te troškove transporta (11). Ušteda zbog emisije CO₂ ovisi o energetske vrijednosti proizvedenog vodika i cijeni λ^{CO_2} . Transportni troškovi također ovise o proizvedenom vodiku i cijeni transporta po jedinici mase λ^{tr} . Posljednja razlika u odnosu na tržišni model je u naplati vodika koja se u ovom slučaju odvija po cijeni plina λ_t^h .

$$\max_{dis_t, ch_t, \chi_t^h} \Theta^e + \pi^h + \pi^{CO_2} - \xi^{tr} - \xi^{skl\&odr} - \xi^{voda} \quad (9)$$

$$\pi^{CO_2} = \sum_t \frac{\chi_t^h \cdot 39,4}{1000} \cdot \lambda^{CO_2} \quad (10)$$

$$\xi^{tr} = \sum_t \lambda^{tr} \cdot \chi_t^h \quad (11)$$

$$\pi^h = \sum_t \frac{\chi_t^h \cdot 39,4}{1000} \cdot \lambda_t^h \quad (12)$$

Sva ostala ograničenja jednaka su u za ovaj i za tržišni model.

3.2. Pružanje usluga uravnoteženja

U odnosu na modele trgovanja na dan unaprijed tržištu, modeli za pružanje usluga uravnoteženja sadrže dodatne izraze u funkciji cilja i ograničenjima. Moguće je ponuditi određeni dio kapaciteta baterijskog spremnika te ostvariti prihod od rezerve snage za ponovnu uspostavu frekvencije s automatskom aktivacijom Θ^{KU} , odnosno moguće je ostvariti prihode/rashode zbog pružanja energije uravnoteženja Θ^{EU} . Prihodi od rezerve snage računaju se prema (14) i uvijek su nenegativni. Dan unaprijed zakupljuje se kapacitet za uravnoteženje kako bi se osigurala dovoljna količina energije uravnoteženja u stvarnom vremenu. On ne mora odgovarati količini energije koja će se u stvarnom vremenu iskoristiti u svrhu uravnoteženja, zakupljuje se neovisno u oba smjera te se naplaćuje u HRK/MW. Energija uravnoteženja isporučuje se u stvarnom vremenu od strane korisnika koji su rezervirali dio svog kapaciteta za tu svrhu ili od dobrovoljnih ponuđača (15). Isporučuje se u oba smjera te se u ovisnosti o smjeru mogu ostvariti prihodi, odnosno rashodi – pružanje pozitivne energije uravnoteženja (dodatno injektiranje u mrežu) rezultira prihodom, a negativne (dodatno preuzimanje iz mreže) rashodom. U Republici Hrvatskoj, zbog reguliranih cijena uravnoteženja, cijena pružanja pozitivne energije uravnoteženja veća je od dan unaprijed cijene, a cijena negativne energije uravnoteženja je manja od dan unaprijed cijene. Zato, u odnosu na cijene na tržištu dan unaprijed, pružanje usluge energije uravnoteženja uvijek rezultira prihodom u iznosu razlike cijena na energetsom i tržištu rezervi.

$$\max_{dis_t, ch_t, \chi_t^h} \Theta^e + \Theta^h + \Theta^{CO_2} + \Theta^{KU} + \Theta^{EU} - \xi^{tr} - \xi^{skl\&odr} - \xi^{voda} \quad (13)$$

$$\Theta^{KU} = \sum_t p_t^{KU+} \cdot \lambda_t^{KU+} + \sum_t p_t^{KU-} \cdot \lambda_t^{KU-} \quad (14)$$

$$\Theta^{EU} = \sum_t e_t^{EU+} \cdot \lambda_t^{EU+} - \sum_t e_t^{EU-} \cdot \lambda_t^{EU-} \quad (15)$$

Uz funkciju cilja (13), potrebno je zadovoljiti ograničenja koja su vrijedila i u poglavlju 3.1 uz određene modifikacije, kao i dodatna ograničenja povezana s pružanjem rezerve. Mora se definirati način na koji baterijski spremnik može pružati usluge rezerve snage i energije uravnoteženja, a da se ne naruše ograničenja mrežnog priključka i ograničenja povezana s maksimalnom instaliranom snagom i stanjem napunjenosti spremnika. Rezervu snage prema gore baterijski spremnik je u mogućnosti pružati povećanim pražnjenjem ili smanjenjem punjenja, dok rezervu snage prema dolje može pružati povećanim punjenjem ili smanjenim pražnjenjem. Kao i baterijski spremnik, i elektrolizator je u mogućnosti pružati energiju uravnoteženja u oba smjera – prema gore na način da se smanji proizvodnja vodika, a prema dolje tako da se ona poveća.

I kod modela za pružanje usluga uravnoteženja moguće je primijeniti oba modela prikazana u poglavlju 3.1 – tržišni i CO₂ te se zbog tog mora napraviti modifikacija funkcije cilja (13).

4. REZULTATI

4.1. Ulazni podatci

Simulacije su napravljene za četiri modela opisana u poglavlju 3 za godine 2025., 2030., 2040. i 2050 za Republiku Hrvatsku. Korištene satne cijene električne energije generirane su na bazi cijena iz 2019. godine, uz modifikaciju s obzirom na projekcije o očekivanim prosječnim cijenama u navedenim godinama. Prosječne cijene električne energije, cijena vodika po jedinici mase i cijena plina za navedene godine dane su u Tablica 1.

Tablica 1 Ulazni podatci

Godina	λ_{avg}^e ($\frac{\text{€}}{\text{MWh}}$)	λ^h ($\frac{\text{€}}{\text{kg}}$)	λ^{CO_2} ($\frac{\text{€}}{\text{MWh}}$)	$\lambda_t^{KU+/-}$ (€/MW/h)	λ^{voda} ($\frac{\text{HRK}}{\text{m}^3}$)
2025.	73,71	5,00	12,58	11,61	2,98
2030.	80,00	4,40	13,73	11,61	3,58
2040.	78,00	3,20	17,65	12,9	4,79
2050.	75,00	2,00	22,16	12,21	6,00

Kapitalni troškovi pohrane λ^{spr} iznose 600 €/kg, a pretpostavljena pohranjena količina iznosi X^h 1,156 t. Troškovi održavanja λ^{odr} iznose 1.350 €/kW. Kao trošak vode uzimaju se vrijednosti iz Tablica 1, a η^{voda} je 10. Cijena transporta po jedinici mase λ^{tr} iznosi 1 €/kg.

Pretpostavlja se da cijene za pružanje usluge energije uravnoteženja prema gore iznose 140% cijene električne energije na dan unaprijed tržištu u danom trenutku, a prema dolje 60% cijene na dan unaprijed tržištu u skladu sa zakonima u Republici Hrvatskoj¹. Cijena rezerve snage pretpostavljena je konstantnom kroz godinu¹, a vrijednosti su dane u Tablica 1.

Ograničenje mreže za stranu preuzimanja iznosi 70 MW, a za injektiranje ovisno o instaliranim snagama elektrolizatora i baterijskog spremnika. Razmatrani su slučajevi u kojima se instalirane snage baterijskog spremnika i elektrolizatora mijenjaju po 5 MW. Ukupna snaga preuzimanja može iznositi 5, 10, 15 ili 20 MW. Primjerice, u slučaju snage preuzimanja od 5 MW, moguće je ostvariti kombinacije u kojima elektrolizator ima snagu 5 MW, a baterijskog spremnika nema ili obrnuto. U slučaju snage priključka od 10 MW, moguće su tri kombinacije – baterijski spremnik od 5 MW, elektrolizator od 5 MW, samo baterijski spremnik od 10 MW ili samo elektrolizator od 10 MW. Analogno se rade kombinacije i za slučajeve od 15 i 20 MW priključne snage, što ukupno rezultira s 14 različitih kombinacija simuliranih za 4 spomenuta modela i 4 godine.

¹ <https://www.hops.hr/usluge-uravnotezenja>

4.2. Prikaz rezultata

4.2.1. Tržišni model arbitraže

Na Sliku 1 prikazani su profiti kroz godine za obje moguće kombinacije uz priključak od 5 MW – baterijski spremnik instalirane snage 5 MW bez elektrolizatora i obrnuto. S obzirom da se očekuju poprilično stabilne cijene električne energije u narednim godinama (Tablica 1), profiti baterijskog spremnika su stabilni i kreću se oko 95.000 €. S druge strane, profiti u slučaju uz isključivo instalaciju elektrolizatora padaju kroz godine, zbog očekivanog pada cijena prodajne cijene vodika. Najveći profit očekuje se u 2025. godini te on iznosi 678.228 € i te bi godine elektrolizator radio 87% godine i proizveo 602 tone vodika. U slučaju najmanjeg profita, iznosa -192.816 €, elektrolizator radi 6% godine i proizvede 30 t vodika. Moguće kombinacije za preostale snage priključka donose profite koji linearno rastu u ovisnosti o veličini baterijskog spremnika, odnosno elektrolizatora.



Slika 1 Profiti baterijskog sustava (lijevo) i elektrolizatora (desno) po godinama za priključnu snagu od 5 MW – tržišni model arbitraže

4.2.2. CO₂ model arbitraže

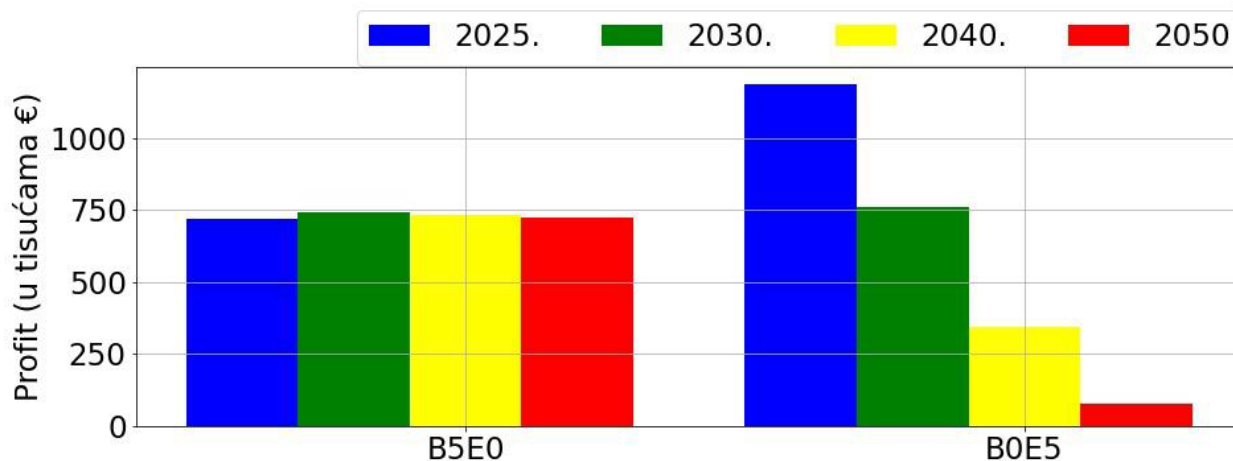
Kao i kod tržišnog modela, profiti baterijskog spremnika stabilni su kroz godine, što je prikazano na Sliku 2. No, za razliku od prethodnog slučaja, u ovom se vodik prodaje po cijeni plina za koju se očekuje da bi trebala rasti kroz naredne godine, zbog čega se i profiti u slučaju kada je instaliran isključivo elektrolizator povećavaju. U slučaju najnižeg profita (-220.435 €) elektrolizator radi samo 1% godine i proizvede 8 tona vodika, dok u 2050. godini profit iznosi -181.153 €. Te godine elektrolizator bi radio 11% vremena i proizveo 53 tone vodika.



Slika 2 Profiti baterijskog sustava (lijevo) i elektrolizatora (desno) po godinama za priključnu snagu od 5 MW – CO₂ model arbitraže

4.2.3. Tržišni model pružanja rezerve

Na Sliku 3 može se uočiti isti trend opisan u poglavlju 4.2.1. Profit baterijskog spremnika stabilan je kroz godine i iznosi nešto manje od 740.000 €, a profit elektrolizatora opada, zbog pada cijena vodika. Približno 70% profita ostvarenog korištenjem baterijskog spremnika odlazi na pružanje usluge rezerve snage za pružanje usluge uravnoteženja, dok na pružanje energije uravnoteženja odlazi 24% profita. Baterijski spremnik gotovo cijelo vrijeme rezervira svoje maksimalni kapacitet. U slučaju elektrolizatora najveće prihode donosi prodaja vodika i rezervacija kapaciteta. U 2025. godini moglo bi se proizvesti 543 tone vodika i tada elektrolizator većinski pruža rezervu prema gore (prihod od energije uravnoteženja), a u 2050. godini 78 tona i većinski isporučuje negativnu energiju uravnoteženja (ostvaruje se rashod).



Slika 3 Profiti baterijskog sustava (lijevo) i elektrolizatora (desno) po godinama za priključnu snagu od 5 MW – tržišni model pružanja rezerve

4.2.4. CO₂ model pružanja rezerve

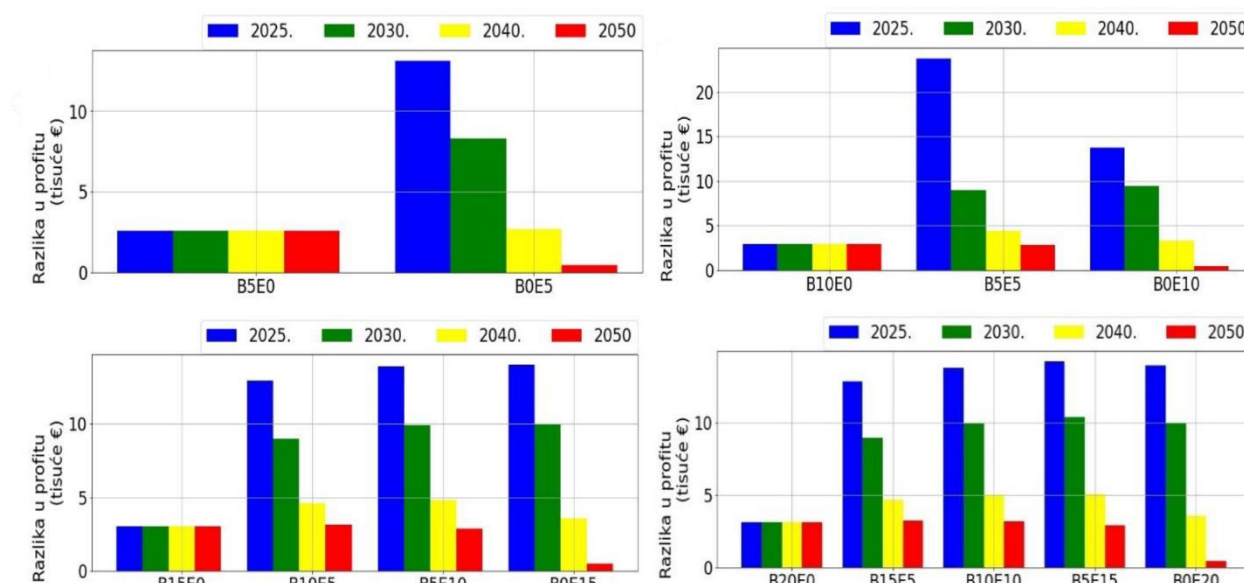
Analogno poglavlju 4.2.2., Slika 4 prikazuje stabilnost profita kroz godine za baterijski spremnik, i rast profita u slučaju samo elektrolizatora, zbog rasta cijena plina. Ponovno blizu 70% profita u slučaju rada baterijskog spremnika odlazi na pružanje usluge rezerve snage, a 24% na pružanje energije uravnoteženja. Elektrolizator najveće prihode ponovno ostvaruje od prodaje vodika i rezervacije snage i većinski sudjeluje u negativnoj energiji uravnoteženja, zbog čega je u svim godinama ostvaren rashod.



Slika 4 Profiti baterijskog sustava (lijevo) i elektrolizatora (desno) po godinama za priključnu snagu od 5 MW – CO₂ model pružanja rezerve

4.2.5. Utjecaj fotonaponskih panela

Kako bi se analizirao utjecaj fotonaponskih (FN) panela na rad postrojenja, u model se uvela i naplata mrežarina prilikom kupnje električne energije u tržišnom modelu arbitraže te je uspoređen slučaj kada FN paneli postoje i kada ne postoje. Mrežarina se u višoj tarifi naplaćuje 0,04 HRK/kWh, a u nižoj tarifi 0,02 HRK/kWh. Zbog naplate mrežarina, elektrolizator radi više u slučaju kada postoje instalirani FN paneli jer nije potrebno kupovati električnu energiju iz mreže za njegov rad. U slučaju priključka od 5 MW, u 2025. godini elektrolizator u slučaju kada postoje FN paneli radi 7.466 sati (85 % godine), a kad ne 7.343 sati (84 % godine). U 2050. godini taj broj se smanji s 418 sati (4,78 % godine) na 375 sati (4,28 % godine). Postojanje FN panela omogućuje povećanje profita od 3,55 % (približno 2.500 €) u slučaju kada postoji samo baterijski spremnik prikazano na Slika 5, odnosno 2,39% (13.116 €) u slučaju kada postoji isključivo elektrolizator. FN paneli pružaju mogućnost smanjenja troškova mrežarina izbjegavajući potrebu za kupnjom električne energije, te zbog toga imaju najveći utjecaj imaju na rad elektrolizatora.



Slika 5 Razlike u profitima baterijskog sustava i elektrolizatora po godinama i svim konfiguracijama za slučajeve za i bez fotonaponskih panela (razlika 'sa'-'bez')

ZAKLJUČAK

Promatrano je postrojenje koje se sastoji od elektrolizatora, baterijskog spremnika i fotonaponskih panela. Analizirani su slučajevi za više različitih iznosa priključne snage i, sukladno tome, za više različitih kombinacija instaliranih snaga baterijskog spremnika i elektrolizatora. Uz to, u obzir se uzela i promjena u cijenama električne energije, plina i vodika kroz godine te se analizirao utjecaj na rad postrojenja. Navedeni slučajevi razmatrani su u okviru dvije moguće primjene spremnika energije – arbitraža i pružanje usluga uravnoteženja sustava (aFRR) i s obzirom na dvije moguće varijante prodaje proizvedenog vodika – kao zamjena za prirodni plin i po jedinici mase.

Najisplativiji model pokazao se onaj u kojem se vodik prodaje po jedinici mase i pruža aFRR uslugu sustavu. Prodaja vodika pruža mogućnost ostvarivanja profita, no uz pretpostavljeni pad cijene vodika u razdoblju do 2050., profit od elektrolizatora ne može se okarakterizirati kao stabilan, već snažno ovisan o tom faktoru. S druge strane, profit od baterijskog spremnika, uz predviđene cijene, može se očekivati približno konstantnim u razdoblju do 2050. Isto tako, uočava se da profiti linearno rastu povećanjem instaliranih snaga baterijskog spremnika i elektrolizatora. Najveći udio u profitu od baterijskog spremnika ostvaruje se od pružanja usluge rezervacije kapaciteta, kojeg nudi u gotovo maksimalnom mogućem iznosu u oba smjera, dok kod elektrolizatora veliki udio odlazi i na prodaju vodika.

U slučaju kada se u obzir uzme i plaćanje mrežarina prilikom kupnje električne energije, vidljiv je utjecaj koji FN paneli imaju na povećanje profita i smanjenje troškova mrežarina. U slučaju kada su FN

paneli instalirani, elektrolizator povećava vrijeme svog rada kroz godinu jer se može direktno opskrbiti, bez kupovine električne energije iz mreže.

ZAHVALA

Rad je dijelom sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost i Europska unija unutar Europskog socijalnog fonda kroz projekt Fleksibilnost mikromreža s visokim udjelom pretvarača – FLEXIBASE (PZS-2019-02-7747) te Europska unija sredstvima Europskog fonda za regionalni razvoj kroz program Konkurentnost i kohezija 2014-2020 Republike Hrvatske kroz ugovor KK.01.1.1.07. Univerzalni komunikacijski i upravljački sustav za industrijska postrojenja.

LITERATURA

- [1] IEA, »Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021,« IEA, Paris, 2022.
- [2] IEA, »Hydrogen,« IEA, Paris, 2021.
- [3] Siemens Energy, »Efficiency - Electrolysis,« 2021.
- [4] Nel, »Containerized PEM Electrolyser — Nel Hydrogen,« 2021.
- [5] H-Tec System, » PEM Electrolyser ME450/1400: H-TEC SYSTEMS,« 2021.