

Nikola Matak, mag.ing.mech
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
nikola.matak@fsb.hr

Doc. dr.sc. Goran Krajačić, dipl.ing.
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
goran.krajacic@fsb.hr

Lucijan Ključević, bacc.ing.mech.
Politecnico di Milano
lucijan.kljucevic@hotmail.com

David Čavar, bacc.ing.mech
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
david.cavar@hotmail.com

POSLOVNI MODEL I TEHNO EKONOMSKA ANALIZA INTEGRACIJE FOTONAPONSKIH SUSTAVA S BATERIJAMA U KUĆANSTVIMA

SAŽETAK

S konstantnim padom cijena fotonaponskih sustava i baterija za skladištenje električne energije postavlja se pitanje u kojem trenutku će kombinacija tih tehnologija proizvoditi električnu energiju povoljnije od cijene po kojoj je potrošači kupuju iz mreže. Potrebno je ispitati poslovni model i napraviti tehnološku ekonomsku analizu koja razmatra integraciju PV sustava s baterijom na mreži te s baterijom u svakom kućanstvu. U prvom dijelu rada se daje pregled cijena fotonaponskih sustava i baterija. U drugom dijelu rada ispituje se isplativost poslovnih modela. Unutar trećeg poglavlja radi se tehnološka ekonomska analiza za životni vijek opreme od 10, 15 i 20 godina. Ispituje se kod koje specifične cijene baterija, fotonaponskog sustava i cijene električne energije iz mreže, električna energija iz takvog sustava postaje jeftinijom od električne energije iz mreže. Isplativost ovakvih sustava u prosječnim kućanstvima u Hrvatskoj se postiže kod cijene iz mreže na razini od 0,16 do 0,26 EUR/kWh, a sadašnja maloprodajna cijena je oko 0,12 EUR/kWh. Cijene baterijskih sustava trebale bi se smanjiti za otprilike 50 % kako bi uz sadašnju cijenu električne energije takvi sustavi bili isplativi.

Ključne riječi: Fotonaponski sustavi, baterije, tehnološka ekonomska analiza, cijena električne energije, isplativost

BUSINESS MODEL AND TECHNO ECONOMIC ANALYSIS OF INTEGRATION OF PV SYSTEM WITH BATTERIES IN THE HOUSEHOLDS

SUMMARY

With constant decrease in the prices of the batteries and the PV systems it is a question of time when these two technologies will produce electricity cheaper than consumer are paying for the electricity from the grid. It is necessary to develop business model and provide techno economic analysis which will investigate the possibility to install PV systems with batteries on grid and in each household. In first part it is given overview of the PV and battery prices. In second part the profitability of business models is investigated. In the third part techno economic analysis is done for the lifetime of the systems of 10, 15 and 20 years. It is investigated in which specific prices of the batteries, PV system and grid electricity the electricity from the new system is cheaper than grid. Profitability is reached with the prices of electricity from 0,16 to 0,26 EUR, and current retail price is 0,12 EUR/kWh. Prices of batteries should be reduced for 50% to reach profitability with current electricity prices.

Key words: PV systems, batteries, techno economic analysis, electricity price, profitability

1. UVOD

Varijabilnost je jedan od najvećih problema obnovljivih izvora energije kao npr. fotonaponskih sustava [1]. Tako su fotonaponski sustavi ovisni o sunčevom zračenju koja se mijenja s vremenom te o drugim nepredvidljivijim pojavama kao što su oblaci. Ova varijabilnost ima za posljedicu razliku između proizvodnje i potrošnje električne energije [2]. Kako bi se riješio problem varijabilnosti postoji nekoliko mogućnosti. Varijabilni izvori mogu se dopuniti drugim varijabilnim izvorima energije koji imaju slabu korelaciju u proizvodnji (npr. fotonaponski sustavi koji su geografski raspršeni) [3]. Potreba za energijom se može prilagoditi dostupnoj mogućoj opskrbi, što se naziva upravljanje potražnjom. I na posljepku, energija se može spremati. Tim načinom se potrošnja energije odvaja od proizvodnje [4].

Upravljanje potražnjom energije može igrati ulogu u smanjivanju vrhunaca potrošnje električne energije, no mogućnost povećanja samodostatnosti je zasad limitirana zbog smanjenog angažmana potrošača, postojanja mnogobrojnih perioda niske potrošnje i zbog poteškoća povezanih s automatizacijom takve potrošnje [4]. Ne očekuje se da će se uporabom električnih automobila značajno promijeniti upravljanje potražnjom. Naime, mala je korelacija proizvodnje energije iz fotonaponskih panela i punjenja električnih vozila u kućanstvima, iako bi to moglo igrati značajnu ulogu u javnom i uslužnom sektoru [5]. Povećana uporaba električne energije za grijanje i hlađenje u kućanstvima pruža veću fleksibilnost [6].

Distribuirana pohrana energije će postati sve prisutnija s rastućom važnosti distribuirane proizvodnje električne energije (u mnogim državama fotonaponski sustavi su mali sustavi sa svega par kW snage [7]) i građevinama kao jednim od najvećih potrošača energije u modernom društvu (stambeni i tercijarni sektor odgovorni su za potrošnju 41 % ukupne energije u EU u 2013. godini [8]). Ukupni instalirani kapacitet fotonaponskih sustava u svijetu stalno raste i dostigao je oko 303 GW instaliranog kapaciteta krajem 2016. godine [9], dok je u EU zasluge za takav rast instaliranih fotonaponskih sustava najvećim dijelom može se pripisati državnim poticajima koji imaju za posljedicu rast potražnje za fotonaponskim sustavima, a to ima za posljedicu pad njihove cijene [10]. Smanjivanjem cijena fotonaponskih sustava, cijena električne energije dobivena iz njih u nekim područjima postala je jeftinija od cijene iz mreže. Paritet s mrežom zajedno s ekonomskom krizom potakli su vlade da smanje poticaje u tom sektoru, najviše u vidu *feed in tariffs* [4].

Povećanje udjela fotonaponskih sustava interferira s normalnim radom mreže navodeći operatore da limitiraju maksimalnu preuzetu snagu koja je u sustavu *feed in tariffs* [4] i [10]. Za distribucijsku mrežu u kojoj je priključak za proizvodnju na istom mjestu gdje i priključak potrošnje vrijedi da ubacivanje električne energije u mrežu dobivene fotonaponskim sustavima dovodi do lokalne promjene napona i iskrivljenja strujnih i naponskih valnih funkcija (harmonija) koji mogu prijeći određene energetske distribucijske standarde [3]. Za velike ulazne iznose fotonaponskih sustava tok električne energije u pod centralu može biti preokrenut utječući na mrežne naponske regulatore koji su dizajnirani za jednosmjerne tokove i naposljetku uključivanjem zaštitnih mehanizama se odspaja fotonaponski sustav [3]. To je posebno važno za fotonaponske sustave kod kojih se izlazne vrijednosti brzo mijenjaju zbog atmosferskih uvjeta dovodeći do treperenja [3]. Na višoj razini mala inercija energije fotonaponskih sustava utječe na držanje mreže u ravnoteži [3]. Svi navedeni problemi se mogu riješiti limitiranjem ubacivanja energije iz fotonaponskih sustava u distribucijsku niskonaponsku mrežu [3].

Mnogo mjera je prihvaćeno kako bi se promoviralo korištenje obnovljivih izvora energije, što ima za posljedicu povećanje instaliranog kapaciteta i smanjivanje cijene opreme jer proizvođači rade veće serije uz brži razvoj novih tehnologija [4]. Manji troškovi povezani s dostupnošću manjih sustava dovode do povećanog kapaciteta distribuiranih energetskih izvora što narušava dosadašnji model energetskih sustava [11]. Kako stambeni sektor ima velik udio u potrošnji ukupno proizvedene energije [12] skupa s povećanom distribuiranom proizvodnjom očekuje se da energetska pohrana u objektima postane sve prisutnija [13].

1.1. Pregled tehnologija PV sustava

Fotonaponske ćelije izrađuju se obično iz silicija (u 98 % slučajeva), no izrađuju se još i od bakrenog i indijevog selenida, kadmijevog telurida te polimera koji mogu doći u obliku monokristala, polikristala ili kao amorfne tvari. Kristali su čvrste tvari čiji su konstituenti (atomi, molekule ili ioni) posloženi u uređen mikroskopski raspored tvoreći kristalnu rešetku [14]. Ukoliko se čitav aktivni obujam ćelija sastoji od samo jednog kristala, onda je takva ćelija monokristalna. Ako se u procesu rasta kristala većih dimenzija formira više kristala i ako se iz takvog kristalnog bloka izreže pločica za izradu solarne ćelije, onda takve ćelije nazivamo polikristalnim ili multikristalnim ćelijama. Amorfne tvari su tvari koji nemaju veliku uređenost kao kristali što znači da nemaju pravilan raspored atoma duljeg dosega.

Tehnologije kojima se dobivaju tanki amorfni filmovi su putem nanošenja raspršivanjem ('sputtering') ili depozicijom iz pare kemijskih reaktanata (CVD) na površinu podloge. Svaka od ovih tehnika depozicije ima specifičnu graničnu temperaturu podloge, ispod koje se dobiva amorfni film, a iznad koje amorfne tvari prelaze u polikristalne. Ukoliko je veličina kristala mala (ispod 3 nm) onda je teško razlikovati kristalnu od amorfne faze. Naime, amorfne tvari ispod 5 nm imaju pravilan raspored atoma. U tom graničnom području, između kristalne i amorfne faze se nalazi tzv. nanokristalna faza (nc-Si) ili mikromorfni materijal. On ima amorfnu fazu, ali se unutar nje nalaze sitna kristalna zrnca.

Nanokristalni silicij je materijal budućnosti za izradu solarnih ćelija. Ima povoljnija svojstva od amornog silicija (a-Si) zbog veće pokretljivosti elektrona, povećane apsorpcije fotona u crvenom i infracrvenom području sunčevog zračenja i zbog znatno veće otpornosti prema degradaciji svojih fotoelektroničkih svojstava [15]. Jako povoljno je što se nc-Si može proizvesti samo mijenjanjem proizvodnih parametara u postojećim pogonima za depoziciju a-Si, metodom CVD, stimuliranom plazmom (PECVD), pri razmjerno niskim temperaturama.

Monokristalni silicij se najčešće proizvodi *Czochralskim* postupkom ili tehnologijom lebdeće zone. Proizvodnja monokristalnog silicija je skuplja, no učinkovitost ćelija je veća i kreće se u rasponu od 13-17 % te se može reći da je u širokoj komercijalnoj upotrebi i pri dobrom svjetlu to najučinkovitija fotonaponska ćelija. Najveći nedostatak je taj što je poluvodič s neizravnim zabranjenim pojasom, što ima za posljedicu da su potrebne veće debljine aktivnog sloja da bi se u što većoj mjeri iskoristila energija sunčeva zračenja. Očekivani životni vijek je od 25 do 30 godina, a izlazna snaga degradira tijekom godina. Tako će nakon 25 godina biti na otprilike 80 % snage. [15]

Multikristalne silicijske ćelije su ekonomski efikasnije u odnosu na monokristalne. Proizvodnja ovih ćelija odvija se na način da se tekući silicij ulijeva u kalupe koji se režu u ploče. Nakon skrućivanja stvaraju se kristalne strukture, a na granicama se stvaraju greške zbog kojih se smanjuje učinkovitost koja je od 10-14 %, a očekivani životni vijek između 20 i 25 godina [15].

Nove tehnologije, koje uključuju primjenu trakastog silicija, imaju prednost što štede i do 50 % materijala jer u proizvodnji nije potrebno rezati vafer. No, kvaliteta i mogućnost proizvodnje nije dovoljno razvijena kako bi primjena ove tehnologije prevladala u bliskoj budućnosti. Učinkovitost ćelija izrađenih iz trakastog silicija je oko 11 % [15].

Nove tehnologije tankog filma primjenjuju poluvodiče s izravnim zabranjenim pojasom i njihove debljine mogu biti znatno manje što ima za posljedicu bitno manji utrošak materijala, a to obećava nisku cijenu i mogućnosti proizvodnje velikih serija ćelija. Solarne ćelije tankog filma su treća generacija solarnih ćelija koje su načinjene od eksperimentalnih poluvodičkih materijala poput bakar-indij-galij-selenida (CIGSS), bakar-indij-diselenida (CIS) ili kadmijeva telurida (CDTe) te organskih materijala, no u masovnu proizvodnju su ušle ćelije izrađene od tankog filma silicija (TFSi). Zbog izvedbe u kojoj se postavljaju tanki filmovi poluvodičkih materijala na podlogu (tzv. supstrat) solarne ćelije su fleksibilne u odnosu na klasične, krute, solarne ćelije, a to omogućava njihovu širu primjenu. No, njihova dosadašnja učinkovitost je znatno manja od klasičnih silicijskih solarnih ćelija te unatoč znatnim naporima ulozenim u istraživanje njihov udio je ostao vrlo skroman, svega oko 6 % [15].

1.2. Pregled tehnologija baterija

Različite kemikalije se mogu kombinirati kako bi se stvorile baterije. Neke mogu biti jeftine, ali zato imati malu gustoću pohrane energije, dok druge mogu imati veliku gustoću pohrane energije, ali zato biti jako skupe. Baterije za primjenu u fotonaponskim sustavima moraju zadovoljiti sljedeće najvažnije uvjete. Moraju biti otporne na česte cikluse punjenja i pražnjenja i otporne na neredovito punjenje do 100 %. Veličina baterija se obično projektira na način da je moguće 5 dana autonomnosti u slučaju oblačnog vremena [16]. Naime, ukoliko se baterija projektira na manje od 3 dana kapaciteta onda će imati veliki broj ciklusa i shodno tome baterija će imati kraći životni vijek [16]. Olovno kiselinske i litij ionske baterije su najčešće u primjeni, no postoje i druge vrste baterija. U nastavku su nabrojane neke vrste baterija i ukratko predstavljene njihove najvažnije karakteristike.

Olovno kiselinske baterije su najjeftinija opcija za spremanje energije u stambenim objektima [7], iako se najviše koriste za neprekidno napajanje ili za samostalne instalacije [2]. Imaju manju gustoću energije u usporedbi s drugim tehnologijama, no to nije bitno za stambene svrhe, dok je primjerice u automobilima bitno [7]. U današnje vrijeme olovno kiselinske baterije se uglavnom koriste u akumulatorima automobila. Olovno kiselinske baterije koje se koriste za pohranu energije u stambenim objektima su poznate kao *deep cycle* baterije ili solarne baterije. Takve baterije imaju deblje ploče koje omogućuju dublje pražnjenje što ima za posljedicu dulji životni vijek, ali uz manju energetske gustoću. Olovno kiselinske baterije se dijele na zabrtvljene i nezabrtvljene (*sealed or unsealed*). Zabrtvljene baterije kao što im i ime govori izrađene su na način da su zabrtvljene, onemogućujući izlivanje i smanjenje gubitka elektrolita izazvanog elektrolizom tijekom korištenja baterije. Iako su skuplje u nabavi

zbog manjih troškova održavanja obično se češće koriste u usporedbi s ne zapečaćenima u distribuiranim fotonaponskim sustavima.

Litij ionske baterije otkako su ušle u komercijalnu uporabu devedesetih godina prošlog stoljeća doživjele su nagli rast u uporabi, posebice u prijenosnim uređajima, ponajprije zbog veće gustoće energije i duljeg životnog vijeka u usporedbi s drugim popularnim tehnologijama kao što su olovno kiselinske baterije [17]. Litij ionske baterije su skupni naziv za baterije koje su bazirane na gibanju litijskih iona [17]. Ove baterije sastoje se od individualnih, standardiziranih ćelija različitih oblika i veličina. Olovno kiselinske baterije su i dalje najzastupljenije u pohrani energije, ali najčešće za neprekidnu opskrbu energijom ili za tzv. *stand-alone* instalacije zbog relativno malog investicijskog troška, limitirane potrebne stručnosti instalatera i ne toliko bitne gustoće spremljene energije u takvim instalacijama. Usprkos tome, iako imaju veći investicijski trošak, litij ionske baterije na kraju budu jeftinije zbog njihovog duljeg životnog vijeka [18]. U početku su se koristile ponajviše u potrošačkoj elektronici, no u posljednjih nekoliko godina se sve više implementiraju u druge svrhe kao npr. električna vozila i pohranu električne energije na mreži te se očekuje da njihova primjena u dosadašnje i nove svrhe jako naraste u budućnosti [4] i [18]. To je dovelo do postepenog porasta proizvodnih kapaciteta u cijelom svijetu što bi, uz nove kemijske izvedbe, trebalo dovesti do smanjenja cijena i učiniti ih atraktivnijom solucijom za spremanje energije u kućanstvima [18]. Točan iznos smanjenja cijena je teško procijeniti, no kako je cijena ćelija najvećim dijelom uvjetovana cijenom sirovina [17] i [18] koje dolaze od nekolicine dobavljača i stoga su podložne variranju cijena zbog primjerice političkih nestabilnosti [19]. Uporabom novih materijala očekuje se drastično smanjenje navedene ovisnosti kao i ukupni troškovi, ali u konačnici može imati negativne posljedice jer će recikliranje iz ekonomske perspektive biti manje zanimljivo [20]. Korištene litij ionske baterije iz električnih vozila koje nemaju više potrebnu gustoću spremljene energije za potrebe transportiranja mogu se koristiti u kućanstvima gdje manja gustoća energije nije veliki problem [21]. Uz to, kapacitet korištene baterije električnog automobila je prikladan za stambene svrhe [21]. Kako udio električnih vozila raste i dostupniji je veći broj korištenih litij ionskih baterija po cijenama manjima od novih, isplativost ovakvih instalacija i električnih automobila bi mogla porasti. U suprotnosti s drugim tehnologijama, kao npr. olovno kiselinskim baterijama, litij ionske baterije imaju skoro konstantnu voltažu za veliki raspon napunjenosti baterije [18]. U bateriji neće doći u ravnotežu ćelije različitih razina napunjenosti. Dugoročno gledajući to može izazvati *over-charging* ili pražnjenje nekih ćelija što može dovesti do prijevremenog završetka životnog vijeka ili do nesreća. Iz tog razloga litij ionske baterije moraju biti opremljene s upravljačkom jedinicom. Upravljačka jedinica je elektronički uređaj koji idealno nadgleda različite ćelije, balansira ih i izbjegava njihovu uporabu izvan sigurne radne zone osiguravajući zadržavanje velikog kapaciteta i sigurno funkcioniranje [22].

Litij željezo fosfatne baterije (LiFePO_4) su baterije nove generacije te su nekoliko puta skuplje od olovno kiselinskih baterija istog kapaciteta. Njihove najveće prednosti su manje dimenzije i duplo manja masa od olovno kiselinskih baterija istog kapaciteta zbog manjeg broja ćelija u bateriji, veći mogući broj ciklusa punjenja i pražnjenja, nisu načinjene od teških metala ili korozivnih elektrolita te su zbog toga i zbog toga što ne proizvode vodik tijekom punjenja puno sigurnije u usporedbi s olovno kiselinskim baterijama. Također, njihovo samo pražnjenje je ekstremno maleno te se mogu koristiti pri visokim temperaturama (čak do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$). No, imaju i svoje nedostatke, neki od nedostataka su da pretjerano punjenje izaziva smanjenje životnog vijeka baterije dok pretjerano pražnjenje može dovesti do kvara ćelija u baterijama. Radi toga potrebna je upravljačka jedinica koja nadgleda napon svake ćelije i osigurava da nikad ne prijeđe svoj određen maksimum, odnosno da nikad ne ode ispod određenog minimalnog napona. Kada se uzme u obzir životni vijek i povećana uporaba u električnim vozilima, razlika cijena tijekom ukupnog vijeka trajanja postaje značajno manja [23].

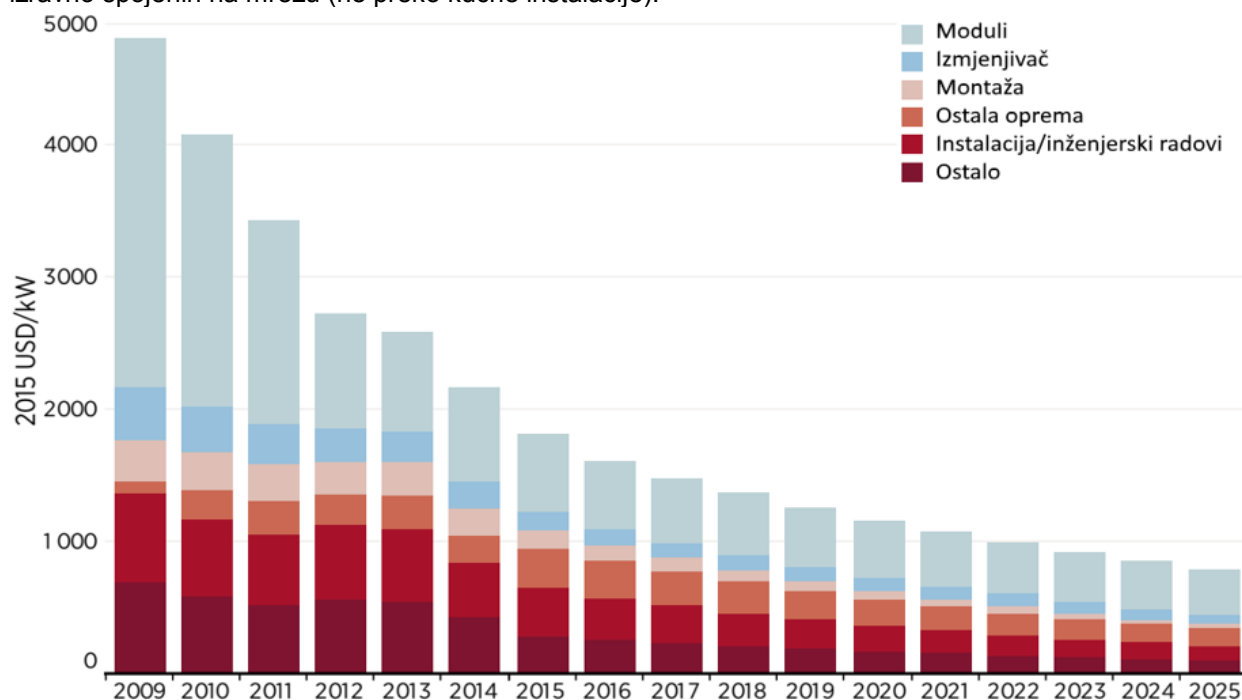
Tipovi baterija koji se rijetko koriste su nikal kadmijske koje zadržavaju svoja inicijalna svojstva nakon dugo vremena, no nemaju dugi životni vijek gledajući broj ciklusa. To ih čini odličnima za hitne/pripravne sustave [24], zatim nikal željezne baterije kojima izlazni napon jako varira u ovisnosti o opterećenju i napunjenosti. Imaju iznimno dug životni vijek, no zbog mnogih nedostataka kao npr. smanjuju efikasnost fotonaponskog sustava do 25 % jer je njihova efikasnost oko 60 %, se ne upotrebljavaju [24].

Flow baterije rastu kao nova opcija spremanja energije. *Lux Research* očekuje da će litij-ionske baterije dominirati tržištem stacionarne energije dok bi trenutačna generacija *flow* baterija mogla dominirati tržištem jako velikih i dugoročnih primjena baterija zbog svoje ekonomske isplativosti u tim slučajevima. *Vanadium redox flow battery* (VRFB) su najrazvijenija tehnologija u ovom području. Cijena ovih baterija bi se trebala značajno smanjiti do 2024. godine zbog korištenja vanadija iz letećeg pepela (produkt termoelektrana na ugljen). VRFB istraživači razvijaju nove načine kako bi povećali gustoću energije, što će dalje smanjiti troškove. Ove baterije su jako kompleksne jer zahtijevaju pumpe, senzore, kontrolne jedinice, sekundarne spremnike. Svi ovi dijelovi troše instalacijski prostor. Prednosti ovih baterija su da vanadij elektrolit ne degradira tokom vremena, što znači da im je životni vijek značajno dulji

od drugih tehnologija. Također kod VRFB baterija je zgodno što se kapacitet baterija povećava jednostavno dodavanjem elektrolita, dok je kod normalnih baterija jedini način povećanja kapaciteta dodavanje još baterija. VRFB baterije nemaju ograničen broj ciklusa. Broj punjenja i pražnjenja ne utječe na njihov vijek trajanja. Što se tiče sigurnosti, *flow* baterije sadrže elektrolit koji je baziran na vodi koji se ne zagrijava i ne može se zapaliti, a to ih čini intrinzično sigurnima. Reciklirani vanadij iz *flow* baterija nije toksičan i može se koristiti iznova za druge namjene, kao npr. u proizvodnji čelika. [25].

1.3. Cijene PV sustava i baterija

Iako imaju relativno mali udio, solarni fotonaponski sustavi, imaju najbrži rast među obnovljivim tehnologijama. Instalirani kapacitet iznosi 303 GW od čega je 74 GW bilo instalirano u 2016. godini [26]. Takav rast posljedica je velikog pada cijena fotonaponskih modula koji je u nekim državama doveo do pariteta mreže (*engl. grid parity*). Na sljedećem dijagramu (Slika 1) može se vidjeti pad cijena PV sustava izravno spojenih na mrežu (ne preko kućne instalacije).



Slika 1. Prosječna ponderirana cijena PV sustava izravno spojenih na mrežu u svijetu [27]

Paritet mreže se postiže kada je nivelirana cijena električne energije (LCOE) proizvedene u fotonaponskim sustavima niža ili jednaka cijeni po kojoj se ona kupuje iz mreže. LCOE je ekonomski pokazatelj cijene proizvodnje električne energije koji uključuje sve troškove u životnom vijeku elektrane. Troškovi obuhvaćaju početnu investiciju, operativne troškove, održavanje, cijenu kapitala i cijenu goriva koja je kod PV-a jednaka nuli [28]. LCOE se može izračunati pomoću sljedeće formule (1):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

I_t - investicijski troškovi

M_t - operativni troškovi i troškovi održavanja

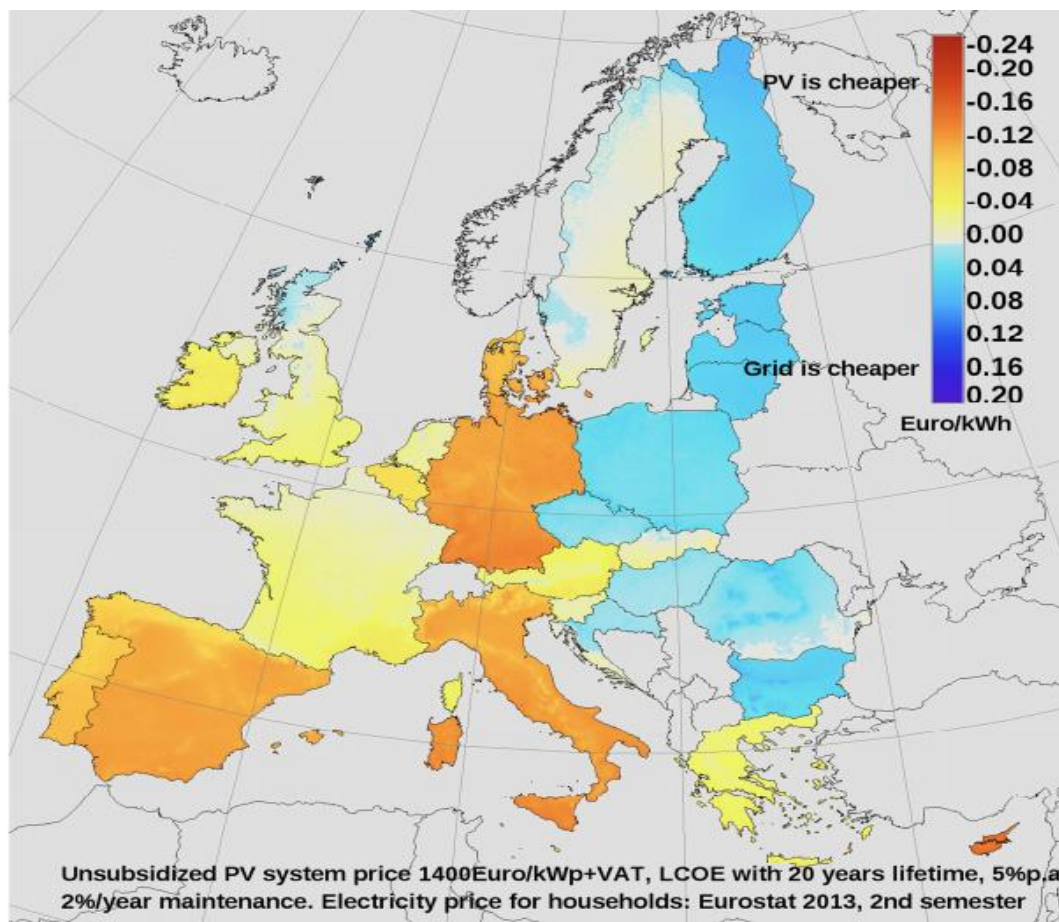
F_t - potrošnja goriva

E_t - proizvodnja električne energije

r - diskontna stopa

Na sljedećoj karti (Slika 2) mogu se vidjeti zemlje u Europi u kojima je do 2013. godine postignut paritet mreže za male PV sustave: Kod proračuna LCOE-a za ovu sliku koristio se model neto mjerenja,

diskontna stopa od 5 %, cijena investicije 1400 €/kW + PDV, godišnje održavanje u iznosu od 2 % početne investicije. LCOE pokazuje potencijal neke tehnologije, ali stvarna financijska isplativost ovisi o nizu različitih faktora poput udjela samoopskrbe i načina naplate isporučenih viškova u mrežu.



Slika 2. Paritet mreže u EU, 2013. [29]

1.3.1. Cijene baterija za mrežnu primjenu

Cijene baterija za primjenu s fotonaponskim sustavima podijeljena je prema [30] na baterijske sustave veličine izražene u MW i u kW. Dodatno, u baterije čije su snage izražene u MW podijeljene na primjenu u mrežnim aplikacijama i primjenu u industriji. Cijene koje će biti ovdje prikazane odnose se na baterije koje se koriste u mrežnim aplikacijama te njihov kapacitet može biti oko 1 MWh. One su dodatno podijeljene na baterije koje se mogu koristiti za integraciju OIE i za potporu stabilnosti mreže. Za integraciju OIE koriste se dvije vrste baterija. Li-ion baterije koje mogu biti snaga od 1 do 100 MW, kapaciteta od 0,25 do 25 MWh i cijena po kW je od 870-1250 EUR, odnosno 3500-5000 EUR/kWh. Napredne olovne baterije koje imaju isti raspon snaga, a kapacitet može biti do 50 MWh. Cijena je po kW od 760-1280 EUR, odnosno 2230-3060 EUR/kWh.

1.3.2. Cijene baterija za primjenu u kućanstvima

Baterije koje se mogu koristiti u kućanstvima za skladištenje energije ima nekoliko vrsta te su prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Kapacitet, snaga i specifični troškovi baterija za primjenu u kućanstvima [30]

Vrsta baterije	Kapacitet [kWh]	Snaga [kW]	Troškovi [EUR/kW]	Troškovi [EUR/kWh]
Olovne baterije	10	5	3640-4500	1820
	20			1130
Zn/Br protočne baterije	9-30	3-15	1610-5070	630-1270
Li-ion baterije	7-40	1-10	1000-8850	640-1810

S obzirom da na tržištu postoji velik broj ponuđača baterija koje se mogu koristiti u kućanstvima u kombinaciji s PV panelima u tablici 2 ćemo dati prikaz nekoliko najkompetitivnijih baterija koje se trenutno mogu naći na tržištu.

Tablica 2. Pregled komercijalno dostupnih baterija za kućanstva na tržištu [31]

Naziv baterije	Korisni kapacitet [kWh]	Cijena baterije [EUR]	Specifična cijena [EUR/kWh]
Tesla Powerwall	13,2	4425	335
LG Chem RESU	5,2	2410	463
PylonTech	1,92	885	461
Aquion Energy	1,7	925	544
Narada Lead-Carbon	4	2090	523
BAE Gel Lead-Acid	14,6	7500	514
Nissan XStorage [32]	4,2	3620	862
SonnenBatterie Eco [32]	16	8000	500
Mercedes-Benz Energy Storage Homes [33]	2,5	4020	1608
	20	10460	523

1.4. Poticaji za uvođenje PV sustava s baterijama u kućanstvima

U novije vrijeme uvode se poticajne politike potičući distribuirane sustave za pohranu energije. U 2013. godini, Njemačka je uvela poticajni program za distribuirane fotonaponske sustave skupa sa sustavima za pohranu električne energije što je smanjilo cijenu kao što se ranije dogodilo sa fotonaponskim sustavima [34]. Ponuđeni poticaji su osmišljeni kako bi smanjili cijenu, ali u početku su se sastojali od niskog kamatnog zajma i rabata na troškove. Čak do 30 % troškova sustava ili 660 EUR/kW za sustave do 30 kW [34]. Švedska je također lansirala poticajni program za kućne sustave spremanja energije s pokrivanjem 60 % troškova sustava do maksimalno 50 000 švedskih kruna s ciljem boljeg iskorištavanja fotonaponskih sustava uz bolju stabilizaciju mreže [35]. U Kaliforniji je program za poticanje samostalne proizvodnje električne energije financirao nekoliko projekata za distribuirano spremanje energije. U 2017. godini je osigurano 500 američkih dolara/kWh popusta za spremanje energije do 10 kW u stambenim zgradama [36]. Općine su se također uključile u sustav financiranja putem poticaja, tako se u Adelaideu od 2015. nude rabati do 50 % cijene instaliranog sustava, do maksimalno 5000 američkih dolara, za sustave za pohranu energije kao dio programa poticaja za održivost u kojem se nude naknade za vodu i energetske uređaje kako bi se smanjile emisije ugljičnog dioksida, uštedila energija, voda i drugi resursi [37].

Kada se dimenzionira fotonaponski sustav s baterijama za povećanu samodostatnost u kućanstvu, različite konfiguracije FN sustava i kapaciteta baterija mogu rezultirati jednakom samodostatnošću [38]. Također, što je veći FN sustav i kapacitet baterije, to su veći troškovi instalacije [38]. Cilj je naći snagu FN sustava i kapacitet baterije koji će dostići traženi stupanj samodostatnosti uz minimalan trošak [38].

2. MODEL I ULAZNI PODACI

U ovom radu cilj je napraviti poslovni model za integraciju fotonaponskih sustava i baterija u kućanstvima koje su tržišno dostupne od 1,7 do 20 kWh s jedne strane, a s druge strane poslovni model za integraciju fotonaponskih sustava u kućanstvima i baterije na mreži do 1 MWh. Navedeni poslovni modeli će biti popraćeni tehno ekonomskom analizom kako bi se pokazala isplativost projekta. Model je razvijen na primjeru otoka Mljet. U tom primjeru pretpostavila se potrošnja električne energije od 4200 kWh godišnje, što odgovara srednjem do velikom kućanstvu prema [39]. Takva potrošnja je predviđena zbog povećanje potrošnje električne energije na otocima zbog većih potreba za električnim hlađenjem i grijanjem. Potrošnju energije od 4200 kWh godišnje na otoku Mljetu pokriva fotonaponski sustav od 3120 W prema [40]. Baterije koje su izabrane su Tesla Powerwall jer nude najbolji omjer kapaciteta i vrijednosti u ispitivanju baterija do 20 kWh, između ostalog jer u sebi imaju ugrađen pretvarač napona [31]. S ovakvim pretpostavljenim parametrima napravljena je tehno ekonomska analiza pomoću programa Excel. Napravljene su tablice prihoda, rashoda, investicija i konačnog novčanog toka te se pomoću funkcija NPV (*net present value*) i IRR (*internal rate of return*) u Excelu ocijenila isplativost projekta. Jednadžba 1. Matematički zapis funkcije NPV prema [41] je:

$$NPV = \sum \{ \text{novčani tok nakon poreza} / (1+r)^t \} \quad (1)$$

r- diskontna stopa

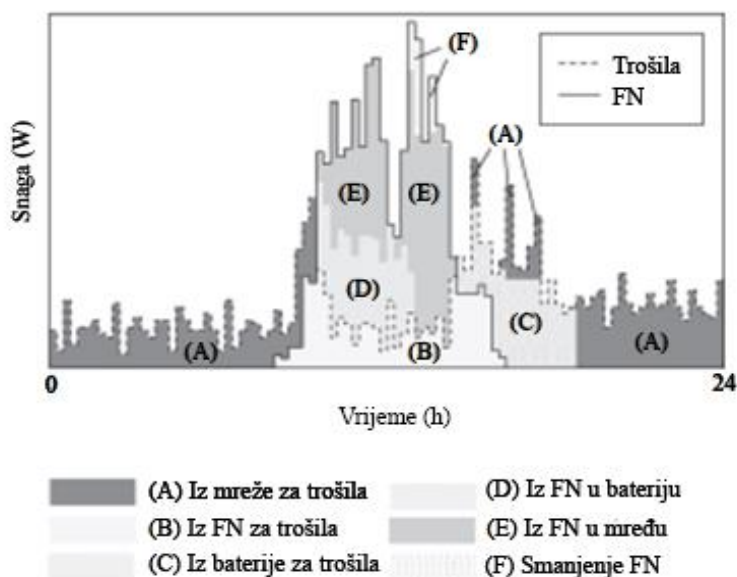
t- vremenski period

IRR se određuje gore navedenom formulom, ali na način da se određuje diskontna stopa r pri kojoj je NPV jednak nuli. U tom slučaju diskontna stopa r je jednaka IRR-u

2.1. Potrošnja električne energije u kućanstvima

Tipična potrošnja električne energije u stambenim objektima sastoji se od jednog vrhunca potrošnje električne energije ujutro, a drugog predvečer te malom potrošnjom električne energije u početku dana. S druge strane proizvodnja električne energije putem fotonaponskih sustava ima tipičnu krivulju s vrhuncem u sredini dana kada je najveće sunčevo zračenje. Ove krivulje će činiti karakteristični uzorak dnevnih tokova električne energije u kućanstvu opremljenog s fotonaponskim sustavom i baterijama i njihovi odnosi su prikazani na slici 3.

Nakon izlaska sunca postoji FN energija koja je dostupna te se ona troši na opterećenje (B-FN energija ide u opterećenje) dok se ostatak energije snabdijeva iz mreže (A-mreža-opterećenje). Kako se sunčevo zračenje pojačava dolazi se do točke gdje se FN energija u potpunosti koristi za snabdijevanje opterećenja, a viškom energije se pune baterije (D). Ukoliko su baterije napunjene, a postoji još viška energije onda se ta energija predaje u mrežu po unaprijed dogovorenoj tarifi (E). No, ako postoji višak energije koji se ne može prodati u mrežu onda se smanjuje efikasnost FN sustava čime se smanjuje proizvodnja električne energije (A). U popodnevним satima kada padne proizvodnja električne energije iz FN sustava potrebna električna energija za trošila se dovodi iz baterija (C) i/ili iz niskonaponske električne mreže (A) te se taj krug ponavlja svakodnevno.

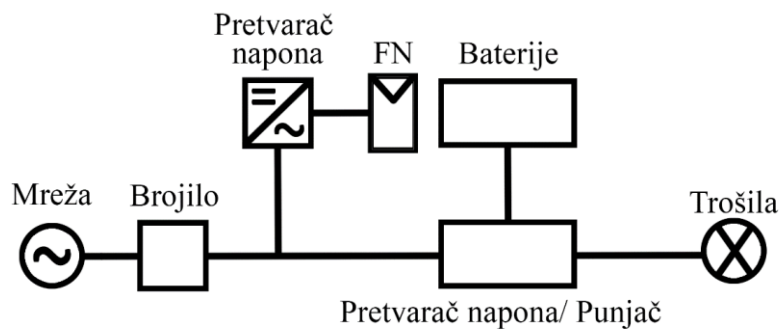


Slika 3. Karakteristični uzorak dnevnih tokova električne energije u kućanstvu [42]

2.2. Shema sustava

U radu se razmatraju dva različita sustava tj. dva različita poslovna modela jedan u kojem je investitor Tvrtka A i baterija se nalazi u svakom kućanstvu posebno te u kojem je investitor tvrtka B i baterija se nalazi na mreži te ju koriste sva kućanstva.

2.2.1. Sustav s baterijom u kućanstvu

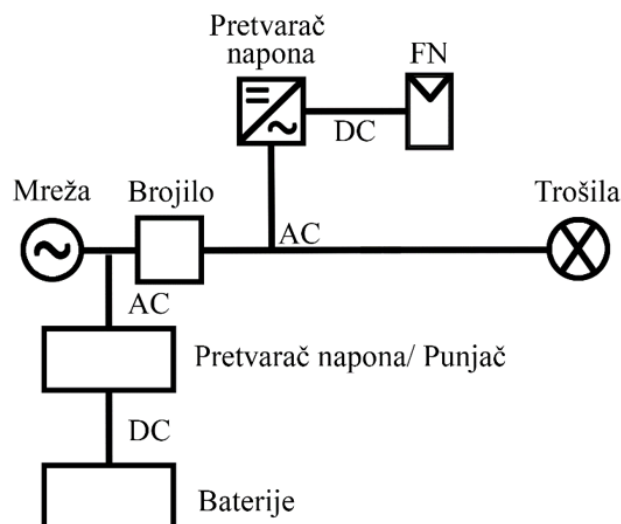


Slika 4. Shema sustava u kojem je baterija u kućanstvu

Konfiguracija koja se razmatrala sastoji se od fotonaponske instalacije s inverterom/punjačem spojenog s baterijama i prikazana je na slici 4. Inverter/punjač je glavna komponenta sustava jer regulira tok električne energije direktno ili indirektno ovisno o FN inverteru i brojilu. Kako tržište invertera/punjača raste u zadnjim godinama cijene su u konstantnom padu uz stalno unaprijeđenje novih komponenti kojima je potrebno manje dodataka što dodatno smanjuje cijenu i bolje se adaptiraju s kućnim litij-ionskim baterijama. Ovakva konfiguracija se najčešće koristi jer se lako izmjenе postojeće elektro instalacije te se na ovakav način projektira sustav koji je manje ovisan o kapacitetu FN-a [43].

2.2.2. Sustav s baterijom na mreži

Ovakva konfiguracija sustava je slična konfiguraciji sustava u kojem je baterija u kućanstvu, ali za razliku od njega u ovakvom sustavu se nalazi jedna velika baterija koja u ovom primjeru pohranjuje električnu energiju ekvivalentnu 71 kućnoj bateriji. Shema takvog sustava prikazana je na slici 5. On radi po sličnom principu kao i prije navedeni sustav. Ukoliko se pokrije potreba za električnom energijom te ostane viška električne energije ona se sprema u bateriji koja se nalazi na mreži i ponovno se upotrebljava kada je to potrebno. Ovakvu bateriju moguće je smjestiti npr. pored trafostanice, u podrumima velikih zgrada i na bilo kojem drugom prigodnom mjestu uz uvjet da su potrošači relativno blizu. Ovakva baterija je ekonomski isplativija u usporedbi s kućnim baterijama ukoliko su gusto smješteni potrošači.



Slika 5. Shema fotonaponskog sustava u kojem je baterija na mreži

3. REZULTATI

Cijena solarnog sustava od 3120 kW je dobivena ponudom Solarshopa iz Zagreba te iznosi 4707 EUR. Prosječna vrijednost godišnje insolacije na otoku Mljetu iznosi oko 1830 kWh/m², što znači da ovakav sustav proizvodi oko 4300 kWh godišnje električne energije [40]. U slučaju tvrtke A izabrana je baterija Tesla Powerwall koja može spremiti 14 kWh električne energije po cijeni od 6770 EUR uz inverter i ostale komponente dok je u slučaju tvrtke B uzet primjer instalacije Teslinog Powerpacka čija je cijena

oko 303 700 EUR za 1,03 MWh. Za efikasnost sustava je uzeto da linearno pada kroz godine do konačnih 80 % nakon 20 godina [44]. Cijene električne energije su uzete po HEP-ovom cjeniku iz rujna 2017. uz pretpostavljen godišnji rast cijene od 2 %. Razmatra se idealni slučaj u kojem je proizvodnja i potrošnja električne energije približno jednaka, a baterija nadoknađuje energiju kada to nije slučaj. Zbog toga je izostavljeno razmatranje ubacivanja električne energije u mrežu.

Tablica 3. Parametri tehno ekonomske analize

Parametar	Tvrtka A-baterija u kućanstvu	Tvrtka B- baterija na mreži
Diskontna stopa	5 %	5 %
Cijena FN sustava	4707 EUR	4707 EUR
Proizvodnja električne energije putem FN	4340 kWh	4340 kWh
Životni vijek opreme	10, 15 i 20 godina	10, 15 i 20 godina
Cijena baterije	6770 EUR Tesla Powerwall [45]	303 700 EUR – Tesla Powerpack [46]
Kapacitet baterije	14 kWh	1,03 MWh
Efikasnost sustava	Linearan pad do 80 % nakon 20 godina [44]	Linearan pad do 80 % nakon 20 godina [44]
Električne energije (HEP rujna 2017.)	0,1167 EUR/kWh	0,1167 EUR/kWh
Fiksno plaćanje za opskrbu i mjerno mjesto	27,84 EUR/godišnje	27,84 EUR/godišnje
Pretpostavljeni godišnji rast cijene električne energije	2 %	2 %

Nakon provedene tehno ekonomske analize, čiji su parametri prikazani u tablici 3., zaključeno je da se za tvrtku A za niti jedan životni vijek ne dobiva isplativost projekta. Dobivaju se redom za 10, 15 i 20 godina IRR vrijednosti od -10 %, -2 % te 1 % dok su cijene baterije za koju je projekt isplativ redom 366 EUR, 1963 EUR te 3387 EUR. Dok su za tvrtku B redom IRR vrijednosti za 10, 15 i 20 godina -6 %, 1 % te 4 %, a cijene baterije za koju je projekt isplativ redom 370 EUR, 2017 EUR te 3326 EUR po kućanstvu. Slučaju tvrtke B razmatran je na način da se kapacitet Tesla Powerpacka podijeli na 75 kućanstava što odgovara kapacitetu Tesla Powerwalla od 14 kWh. Ukoliko pretpostavimo da svako kućanstvo ne koristi 14 kWh nego primjerice 7 kWh ili 10 kWh kapaciteta Tesla Powerpacka dobivamo sljedeće rezultate: Za 7 kWh svako kućanstvo treba izdvojiti 2065 EUR za svoj dio baterije, a IRR vrijednosti su redom za 10, 15 i 20 godina -1 %, 5 % te 7 %, dok za 10 kWh baterije po kućanstvu svako kućanstvo od njih ukupno 103 treba izdvojiti 2949 EUR za svoj dio baterije te su IRR vrijednosti redom -3 %, 3 % te 6 %. Cijene električne energije kod kojih je sustav s baterijom i PV panelima u kućanstvima isplativ prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Cijena električne energije pri kojoj je sustav isplativ

Životni vijek opreme (godina)	10	15	20
Tvrtka A (Tesla Powerwall 14 kWh)	0,26 EUR/kWh	0,20 EUR/kWh	0,16 EUR/kWh
Tvrtka B (Tesla Powerpack 14 kWh po kućanstvu)	0,20 EUR/kWh	0,15 EUR/kWh	0,13 EUR/kWh
Tvrtka B (Tesla Powerpack 10 kWh po kućanstvu)	0,18 EUR/kWh	0,14 EUR/kWh	Isplativo je- IRR=6%
Tvrtka B (Tesla Powerpack 7 kWh po kućanstvu)	0,15 EUR/kWh	0,12 EUR/kWh	Isplativo je- IRR=7%

*Pri analizi troškova električne energije fiksni dio troškova za opskrbu i priključak u iznosu od 27,84 EUR godišnje je ostao konstantan.

4. ZAKLJUČAK

Hrvatska, pogotovo njeni južniji dijelovi zbog velike insolacije imaju značajan fotonaponski potencijal. U ovom radu analizirana je mogućnost integracije fotonaponskih sustava s baterijama u kućanstvima i baterijom na mreži na otoku Mljetu. Nakon provedene tehnološke i ekonomske analize zaključeno je da je projekt neisplativ za analizirane slučajeve u kojima svako kućanstvo ima na raspolaganju 14 kWh kapaciteta električne energije bilo u bateriji na mreži (Tesla Powerpack) bilo u bateriji u kućanstvu (Tesla Powerwall), a glavni razlog je previsoka cijena baterija. Iako se predviđa da će ta cijena vremenom padati kako će doći do razvijanja novih tehnologija to u ovom trenutku još nije slučaj. Također, porastom broja električnih automobila otvara se mogućnost korištenja njihovih baterija koje će postati nedovoljno dobre za namjenu u automobilima zbog smanjene gustoće energije što za stambene svrhe nema veliki značaj. Baterije bi u primjeni s fotonaponskim sustavima mogle revolucionirati način na koji koristimo energiju te je sad tek početak njihove primjene i očekuje se daljnji razvoj. One omogućuju spremanje viška proizvedene električne energije te njegovo korištenje kada je to potrebno. Ukoliko promatramo bateriju od 1 MWh ona nudi maksimizaciju iskoristivosti kroz napredne sustave vođenja i pretpostavku da svako kućanstvo neće kontinuirano koristiti 14 kWh zakupljeno. Kao što je pokazano uz pretpostavku zakupa 7 kWh po kućanstvu, odnosno 10 kWh po kućanstvu ostvarena je isplativost uz vijek trajanja opreme od 20 godina.

5. LITERATURA

- [1] D. Parra, M. Gillott, S. A. Norman i G. S. Walker, "Optimum community energy storage system for PV energy timeshift," *Applied Energy*, Vol. 137, pp. 576-587, 2015.
- [2] A. Colmenar-Santos, S. Campíñez-Romero, C. Pérez-Molina i M. Castro-Gil, "Profitability analysis of grid-connected photovoltaic facilities for household electricity self-sufficiency," *Energy Policy*, Vol. 51, pp. 749-764, 2012.
- [3] S. Shivashankar, S. Mekhilef, H. Mokhlis i M. Karimi, "Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 1170-1184, 2016.
- [4] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson i J. Palm, "Photovoltaic self-consumption in buildings: A review," *Applied Energy*, Vol. 142, pp. 80-94, 2015.
- [5] J. Munkhammar, P. Grahn i J. Widén, "Quantifying self-consumption of on-site photovoltaic power generation in households with electric vehicle home charging," *Solar Energy*, Vol. 97, pp. 208-216, 2013.
- [6] B. Drysdale, J. Wu i N. Jenkins, "Flexible demand in the GB domestic electricity 2030," *Applied Energy*, Vol. 139, pp. 281-290, 2015.
- [7] J. Hoppmann, J. Volland, T. S. Schmidt i V. H. Hoffmann, "The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems – A review and a simulation model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 39, pp. 1101-1118, 2014.
- [8] „Eurostat,” Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database> on 11/07/2015.
- [9] „greentechmedia,” 19.9.2017. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/iea-global-installed-pv-capacity-leaps-to-303-gw>.
- [10] P. Balcombe, D. Rigby i A. Azapagic, "Energy self-sufficiency, grid demand variability and consumer costs: integrating solar PV, Stirling engine CHP and battery storage," *Applied Energy*, Vol. 155, pp. 393-408, 2015.
- [11] European Commission, "Best practices on Renewable Energy Self-consumption," European Commission, Brussels, 2015.
- [12] J.-P. Petersen, "Energy concepts for self-supplying communities based on local and renewable energy sources: A case study from northern Germany," *Sustainable Cities and Society*, Vol. 26, pp. 1-8, 2016.
- [13] D. Parra i M. K. Patel, "Effect of tariffs on the performance and economic benefits of PV-coupled battery systems," *Applied Energy*, Vol. 164, pp. 175-187, 2016.
- [14] N. W. Ashcroft i D. N. Mermin, *Solid state physics*, Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- [15] A. Čotar, *Fotonaponski sustavi*, Rijeka, 2012.
- [16] „solardirect,” Available: <http://www.solardirect.com/pv/pvbasics/pvbasics.htm>.
- [17] D. Chung, E. Elgqvist i S. Santhanagopalan, "Automotive lithium-ion battery (LIB) supply chain and

- U.S. competitiveness considerations," Clean Energy Manufacturing Analysis Center, 2015.
- [18] B. Diouf i R. Pode, „Potential of lithium-ion batteries in renewable energy," *Renewable Energy*, Vol. 76, pp. 375-380, 2015.
- [19] K. M. Grace, „Where will the graphite, lithium and cobalt for the battery revolution come from? The mining report," 2015.
- [20] Wang X et al. Economic and environmental characterization of an evolving Li-ion battery waste stream. *J Environ Manage*, 2014.
- [21] A. Assunção, P. S. Moura i A. T. de Almeida, „Technical and economic assessment of the secondary use of repurposed electric vehicle batteries in the residential sector to support solar energy," *Applied Energy*, Vol. 181, pp. 120-131, 2016.
- [22] K. Darcovich, B. Kenney, D. D. MacNeil i M. M. Armstrong, „Control strategies and cycling demands for Li-ion storage batteries in residential micro-cogeneration systems," *Applied Energy*, Vol. 141, pp. 32-41, 2015.
- [23] Available: <http://www.small-farm-permaculture-and-sustainable-living.com/what-are-the-best-batteries-for-stand-alone-power-systems1.html>.
- [24] „solar-electric," Available: <https://www.solar-electric.com/learning-center/batteries-and-charging/battery-types-for-solar-electric-systems.html>.
- [25] Available: <http://www.solarpowerworldonline.com/2015/08/what-is-the-best-type-of-battery-for-solar-storage/>.
- [26] REN21, „Renewables 2017 Global Status Report," REN21 Secretariat, Paris, 2017.
- [27] IRENA, „The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025," 2016.
- [28] A. Jäger-Waldau, „PV Status Report 2016," Joint Research Centre, 2016.
- [29] T. Huld, A. Jäger Waldau, H. Ossenbrink, S. Szabo, E. Dunlop i N. Taylor, „Cost Maps for Unsubsidised Photovoltaic Electricity," Joint Research Centre of the European Commission, 2014.
- [30] EPRI, „Electricity Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits," 1020676, Palo Alto, CA, 2010.
- [31] Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2015/11/19/complete-battery-storage-comparison-and-review>. 22.09.2017.
- [32] „businessinsider" Available: <http://www.businessinsider.com/rechargeable-battery-options-compete-tesla-2017-5/#3-nissan-offers-a-rechargeable-battery-option-called-xstorage-which-holds-42-kwh-of-energy-storage-the-automaker-began-selling-the-xstorage-in-may-in-the-united-kingdom-when>.
- [33] „pickmysolar" Available: <https://blog.pickmysolar.com/mercedes-benz-home-battery-market>.
- [34] Strategic Energy Technologies Information System, „Local storage: the way forward for solar PV?," European Commission, 2013.
- [35] „renewableenergyworld," 2016. Available: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2016/10/sweden-set-to-launch-residential-energy-storage-scheme.html>.
- [36] "Self-generation incentive program", 2017. Available: <http://www.cpuc.ca.gov/sgip/>
- [37] „Adelaide city council," Available: <http://www.adelaidecitycouncil.com/your-council/funding/sustainable-city-incentivesscheme/>. [Pokušaj pristupa 2017].
- [38] M. Egido i E. Lorenzo, „The sizing of stand alone PV-systems: A review and a proposed new method," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 26, br. 1-2, pp. 51-69, 1992.
- [39] „strujaplin," Available: <http://strujaplin.com/energetska-trziste/potrosnja-struje>.
- [40] „PVGIS," Available: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP.
- [41] „investopedia," Available: <http://www.investopedia.com/ask/answers/021115/what-formula-calculating-net-present-value-npv-excel.asp>.
- [42] P. H. Guilherme de Oliveira e Silva, Photovoltaic self-sufficiency of Belgian households using lithium-ion batteries, and its impact on the grid, 2017.
- [43] J. Li i M. A. Danzer, „Optimal charge control strategies for stationary photovoltaic battery systems," *Journal of Power Sources*, Vol. 258, pp. 365-373, 2014.
- [44] „energy informative," Available: <http://energyinformative.org/lifespan-solar-panels/>.
- [45] „Tesla," 25.5.2017. Available: https://www.tesla.com/de_DE/powerwall?redirect=no.
- [46] „businessinsider," 15.05.2017. Available: <http://www.businessinsider.com/tesla-powerpack-2>

commercial-battery-facts-features-2016-11?IR=T#the-powerpack-is-massive-at-a-weight-of-3575-pounds-its-capable-of-storing-up-to-200-kwh-of-energy-per-pack-3.