

Model energetske preskrbe stanovanjske stavbe na osnovi vodikovih tehnologij in fotovoltaične elektrarne

Matic Rutnik¹, David Jovan¹, Gregor Dolanc¹

¹Institut Jožef Stefan, Odsek za sisteme in vodenje, Jamova cesta 39, 1000, Ljubljana, Slovenija
E-pošta: matic.rutnik@ijs.si

Abstract. The subject of the paper is self-sustained green electric power supply of residential buildings based on photovoltaic power, hydrogen technologies and batteries. Photovoltaic power generation depends on season, time in day and weather and it is therefore not aligned with the power demands of residential building. This can be managed by short and long-term storage of electric energy using hydrogen technologies and batteries. In this paper a simulation model of the entire system is developed to support sizing of system components and demonstrate system operation.

1 Uvod

Eden od pomembnih izzivov, ki jih prinašajo obnovljivi viri energije, je njihova odvisnost od dejavnikov, kot so letni čas, čas v dnevu in vremenske razmere. Zato proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov ni mogoče prilagajati dejanskim potrebam po energiji v različnih sektorjih, vključno z industrijo, prometom in zgradbami. Ena možna rešitev za kompenzacijo neskladja med časovnim potekom proizvodnje in porabe električne energije je shranjevanje energije. Z uporabo vodikovih tehnologij je mogoče presežke obnovljive električne energije pretvoriti v vodik z elektrolizo vode ter ga shraniti. V obdobjih pomanjkanja električne energije pa je možno shranjeni vodik pretvoriti nazaj v elektriko z uporabo gorivnih celic. Prispevek se osredotoča na matematično modeliranje in simulacijo lokalnega sistema za energetske oskrbo stanovanjske stavbe, ki temelji na lokalni fotovoltaični elektrarni ter shranjevanju energije v vodik in baterijo, s ciljem ustvariti samozadosten sistem preko celotnega leta. Gre za aktualno temo, ki podpira razogljičenje in zeleni prehod. Izvedene so bile številne študije o zeleni in obnovljivi energiji za stavbe. Npr. študije [1], [2] in [3] obravnavajo razne vidike podobnih lokalnih energetskih sistemov, ki temeljijo na shranjevanju energije s pomočjo vodikovih tehnologij in baterij. Izvedljivost oskrbe z obnovljivo energijo je močno odvisna od lokalnih (regionalnih) dejavnikov, vključno z razpoložljivostjo obnovljive energije, posebnimi potrebami po energiji, cenami električne energije, vladno podporo in subvencijami. Vpliv teh dejavnikov je bil obravnavan v [4] in [5].

2 Opis sistema

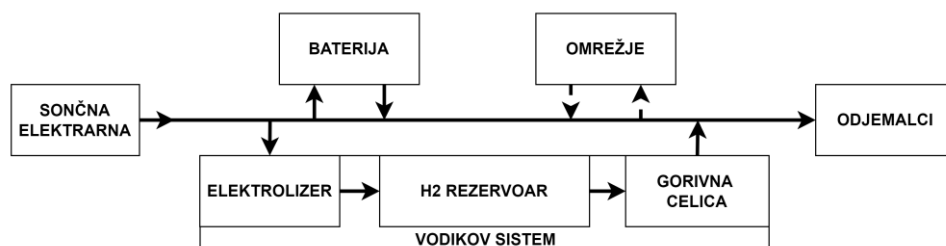
Predpostavljen sistem je sestavljen iz več komponent in ga prikazuje Slika 1. **Fotovoltaična elektrarna** zagotavlja zeleno in brezogljico električno energijo za vse električne porabnike stavbe vključno z ogrevanjem. **Elektrolizer** pretvarja občasne presežke električne energije v vodik, ki se v plinasti obliki pod tlakom shrani v tlačnem **hranilniku**. **Gorivna celica** se uporablja za pretvorbo shranjenega vodika nazaj v električno energijo v obdobjih, ko električna energija, ki jo proizvede fotovoltaična elektrarna, ne pokriva potreb. **Baterija** je opcijski del sistema in se lahko uporablja za kratkotrajno shranjevanje viškov iz dnevnega obdobja za uporabo v nočnem obdobju. **Odjemalce** predstavljajo vse naprave in aparati v stavbi, ki porabljajo električno energijo (ogrevanje, klimatizacija, prezračevanje, razsvetljava, gospodinjski aparati, zabavna elektronika in podobno). Predpostavljena je samostojna stavba stanovanjske površine cca. 200 m² s srednje kvalitetno izolacijo (10-15 cm) in s štirimi stanovalci. **Omrežje** v okviru samooskrbe predstavlja pomožni del energetskega sistema. Lahko prevzema presežke električne energije, ki jih zaradi omejenih kapacitet in moči vodikovega ter baterije sistema ni mogoče shraniti. Omrežje lahko tudi dobavlja električno energijo, kadar trenutno proizvedena fotovoltaična električna moč ter moč iz gorivne celice in baterije skupaj ne zmorejo pokriti porabe. Cilj načrtovanja je, da je odjem iz omrežja minimalen ali nič.

3 Model

Za namene simulacije in optimizacije smo razvili model celotnega lokalnega energetskega sistema ter ga izvedli v okolju Matlab v obliki skripte.

3.1 Model proizvodnje električne energije

Model fotovoltaične elektrarne na podlagi zgodovinskih podatkov simulira moč proizvodnje električne energije v odvisnosti od časa skozi vse leto. Generirana električna



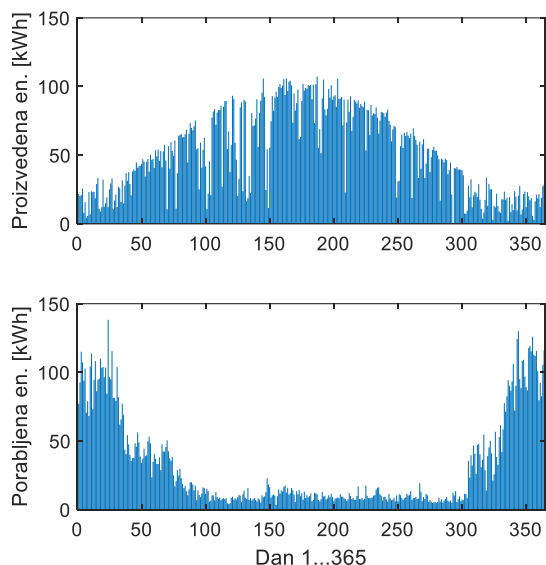
Slika 1: Struktura sistema in modela

moč je sorazmerna s površino in učinkovitostjo fotovoltaičnih panelov ter močjo sončnega sevanja v danem trenutku. Na moč prejetega sončnega sevanja vplivajo dejavniki, kot so sezona, čas v dnevu, vremenske razmere in mikrolokacija elektrarne. Model ne upošteva vpliva temperature na učinkovitost fotovoltaičnih panelov. Slika 2 (gornji graf) prikazuje časovni potek električne energije, ki jo generira predpostavljena fotovoltaična elektrarna stavbe.

3.2 Model porabe električne energije

Tudi model porabe električne energije predpostavljene stanovanjske stavbe temelji na zgodovinskih podatkih. Potek porabljene energije prikazuje Slika 2 (spodnji graf). Poraba izvira iz različnih porabnikov: ogrevanje, klimatizacija, prezračevanje, razsvetljava, gospodinski aparati, zabavna elektronika. Na splošno je dnevni časovni profil porabe električne energije odvisen od letnega časa, vrste dneva (delovnik/vikend/praznik), vremena ter osebnih navad in števila stanovalcev.

Podatki o porabi so organizirani v obliki "look-up" tabele (porabljena električna moč v odvisnosti od časa). Čas vzorčenja je 15 min, podatke pa je priskrbelo podjetje Elektro Ljubljana za obdobje enega leta.

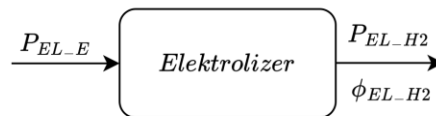


Slika 2: Proizvodnja in poraba električne energije preko celotnega leta po dnevih

3.3 Model elektrolizerja

Uporabljen je enostaven model elektrolizerja, ki opisuje osnovne lastnosti, to je energijsko učinkovitost pretvorbe elektrike v vodik in omejitve obratovalne moči. Kljub temu, da je elektrolizer dinamičen sistem, je uporabljen statičen model v obliki relacije med vhodno električno močjo P_{EL_E} na eni strani in pretokom vodika, izraženim v obliki masnega pretoka ϕ_{EL_H2} in termične moči P_{EL_H2} na drugi strani. Termična moč vodika je produkt masnega pretoka vodika (kg/h) in kurilne vrednosti vodika (HHV), ki znaša cca. 40

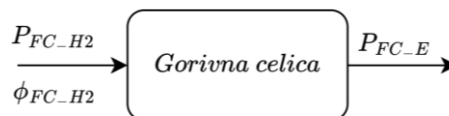
kWh/kg. Razmere kaže Slika 3. Energijski izkoristek elektrolizerja je razmerje med izhodno termično močjo vodika in vhodno električno močjo (P_{EL_H2}/P_{EL_E}) ter se tipično nahaja med 70 in 85 % in pada z obremenitvijo. Elektrolizer sam lahko polni tlačni rezervoar do tlaka cca. 50 bar, pri čemer se voda, potrebna za elektrolizo, dovaja pod potrebnim tlakom. Moč, potrebna za tlačno polnjenje hranilnika vodika prihaja iz elektrolizerja in je upoštevana v izkoristku elektrolizerja.



Slika 3: Model elektrolizerja

3.4 Model gorivne celice

Gorivna celica pretvori shranjeni vodik (in kisik iz okoliškega zraka) v električno energijo in vodo, kar je ravno nasproten proces v primerjavi z elektrolizerjem. Slika 4 prikazuje statični model gorivne celice v obliki relacije med vhodnim pretokom vodika, izraženim v obliki masnega pretoka ϕ_{FC_H2} in termične moči P_{FC_H2} na eni strani in izhodno električno močjo P_{FC_E} na drugi strani. Energijski izkoristek gorivne celice je razmerje med izhodno električno močjo in vhodno termično močjo vodika (P_{FC_E}/P_{FC_H2}) ter tipično znaša 60 % in tudi pada z obremenitvijo.



Slika 4: Model gorivne celice

3.5 Model hranilnika vodika

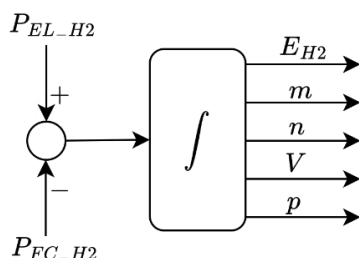
Proizveden vodik se skladišči v plinasti obliki v tlačnem hranilniku vodika. V matematičnem smislu hranilnik vodika predstavlja časovni integrator razlike med termično močjo vodika, ki ga generira elektrolizer (P_{EL_H2}), in termično močjo vodika, ki ga porablja gorivna celica (P_{FC_H2}), kot sledi iz enačbe (1).

$$E_{H2} = E_{H2_INIT} + \int_0^t (P_{EL_H2} - P_{FC_H2}) dt \quad (1)$$

Razmere kaže Slika 5. Količina vodika v hranilniku se lahko izrazi z različnimi veličinami: E – energija (kWh), m – masa (kg), n – množina (mol), V – normalni volumen (Nm^3) in tlak (bar). Pretvorba med veličinami se izvede na podlagi molske mase vodika, kurilne vrednosti in splošne plinske enačbe ($pV = nRT$). Predmet integracije je energija, ostale veličine pa se izrazijo iz energije s pomočjo algebrskih relacij.

3.6 Model baterije

Podobno kot hranilnik vodika je tudi baterija modelirana kot integrator, ki izvaja časovno integracijo razlike med vhodno in izhodno električno močjo, upoštevajoč izkoristek polnjenja in praznjenja.



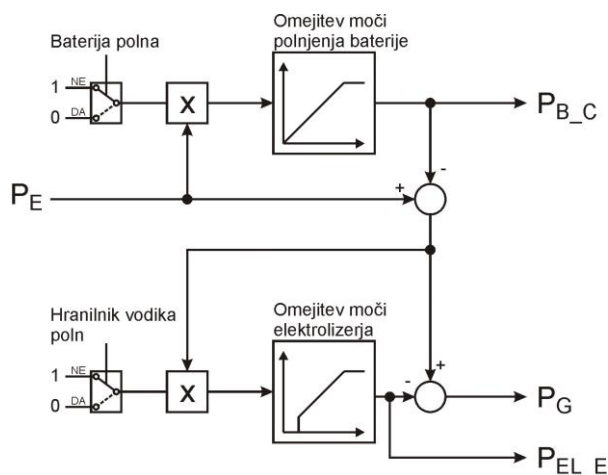
Slika 5: Model hranilnika vodika

4 Sistem za avtomatsko vodenje

Celoten energetski sistem potrebuje za svoje delovanje podsistem za avtomatsko vodenje, ki sproti odloča, kam se hranijo trenutni presežki električne energije in od kod se pokrivajo trenutni primanjkljaji električne energije. Osnovna ideja je, da naj se za kratkoročno balansiranje proizvodnje in porabe električne energije (predvsem dnevno-nočno balansiranje) uporablja baterija, za dolgoročno balansiranje (shranjevanje poletnih viškov za uporabo v zimskem času) pa se uporabi vodikov sistem (t.j. elektrolizer, hranilnik vodika in gorivna celica). Razlog je v tem, da se kratkoročno balansiranje izvaja zelo pogosto (tipično vsak dan) in zahteva relativno nizko kapaciteto shranjevanja. Zato je v ta namen zelo smiselno uporabiti baterijo, saj krožna učinkovitost polnjenja in praznjenja znaša cca. 80 %, medtem ko pri vodikovem sistemu le 45 %. Pri bateriji je krožna učinkovitost produkt učinkovitosti polnjenja (cca. 90 %) in učinkoviti praznjenja (cca. 90 %). Analogno je pri vodikovem sistemu krožna učinkovitost enaka produktu učinkovitosti elektrolizerja (cca. 75 %) in učinkovitosti gorivne celice (cca. 60 %). Če za kratkoročno balansiranje uporabimo baterijo, bodo torej kumulativne izgube vsakodnevne pretvorbe in shranjevanja energije manjše. Za dolgoročno balansiranje pa je vodikov sistem edina možnost, saj je količina energije, ki jo je treba prenesti iz poletne v zimsko sezono, prevelika za baterije. Če bi letno-zimsko shranjevanje izvedli z baterijami, bi to vodilo v izjemno visoke investicijske stroške baterije zaradi njene velikosti, poleg tega pa imajo baterije v primerjavi z vodikovim sistemom bistveno večje samo-praznjenje in bi zato znaten del shranjene energije izgubili.

Skladno z opisanimi pogoji je izveden relativno enostaven krmilni algoritem. V času presežkov proizvedene električne energije skuša algoritem presežno energijo najprej shraniti v baterijo, če to ni v celoti možno, je naslednja opcija vodikov sistem in če tudi to ni v celoti možno, se preostanek viška vodi v omrežje. Pri odločanju se za oba hranilnika (baterija in vodikov sistem) upoštevata dve ključni omejitvi: prosta kapaciteta in največja dovoljena moč polnjenja, pri elektrolizerju pa tudi minimalna možna moč.

V primeru primanjkljaja (kadar proizvedena električna moč ne pokrije porabe), je logika zelo podobna, algoritem skuša manjkajočo moč naprej pridobiti iz baterije, če to ni v celoti možno, potem skuša preostanek dobiti iz gorivne celice vodikovega sistema in če tudi to ni v celoti možno, se preostanek primanjkljaja pokrije iz omrežja. Tudi v tem primeru se pri odločanju za oba hranilnika (baterija in vodikov sistem) upoštevata dve omejitvi: razpoložljiva zaloga energije ter največja dovoljena moč praznjenja (največja moč gorivne celice v primeru vodikovega sistema). Slika 6 prikazuje del celotnega algoritma in sicer za situacijo, kadar se pojavlja presežek generirane moči. Pomen spremenljivk na sliki je naslednji: P_E - presežna moč iz fotovoltaične elektrarne, P_{B_C} - moč polnjenja baterije, P_{EL_E} - moč elektrolizerja za proizvodnjo vodika, P_G - preostali presežek moči, ki teče v omrežje.



Slika 6: Krmilni algoritem za primer, ko generirana moč presega porabo

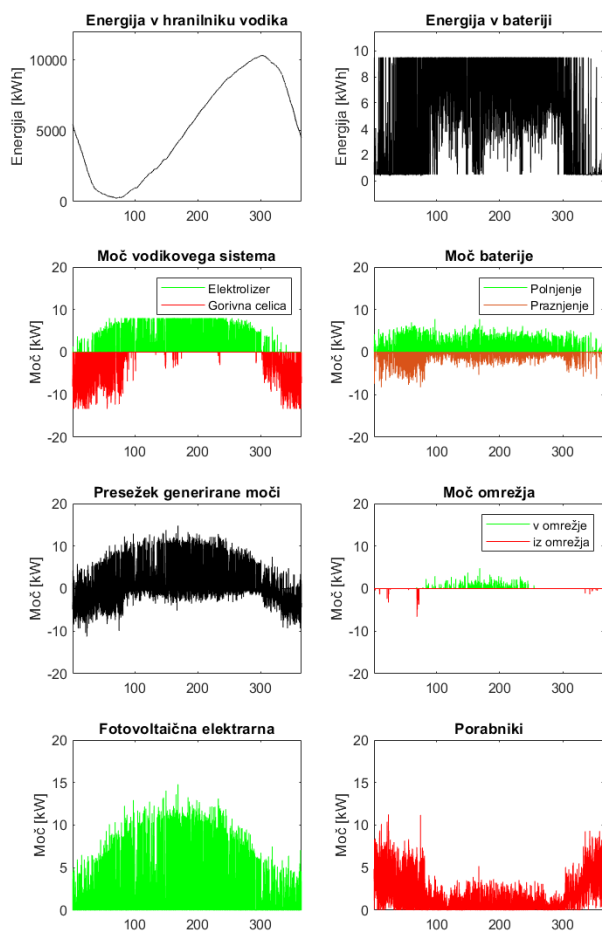
5 Simulacijska študija

Pred izvedbo simulacijskih eksperimentov je potrebno komponente sistema vsaj na grobo dimenzionirati. Da bi baterija lahko izvajala dnevno balansiranje, mora biti njena kapaciteta približno enaka razliki med generirano in porabljenjo energijo v enem dnevu, pri čemer lahko upoštevamo dan v letu, ko je razlika najvišja. Potrebno kapaciteto hranilnika vodika odčitamo šele iz rezultatov simulacije. V modelu najprej predpostavimo občutno predimenzionirano kapaciteto, realna potrebna kapaciteta pa je enaka razliki med najmanjšo in največjo zalogo vodika v hranilniku tekom leta. Največja moč polnjenja baterije in največja moč elektrolizerja morata biti približno enaki največjemu presežku generirane moči nad porabljenjo. Največja moč praznjenja baterije in največja moč gorivne celice pa morata biti enaki največjemu presežku porabljenje moči na generirano. Na ta način je doseženo, da lahko baterija in vodikov sistem vsak zase v vsakem trenutku kompenzirata neskladje med generirano in porabljenjo močjo. Vse to je doseženo s sistemom, katerega parametre podaja Tabela 1. Slika 7 prikazuje delovanje sistema tekom celotnega leta (od 1. jan. do 31. dec.). V začetku leta dnevni primanjkljaji moči prevladujejo nad presežki, manjkajoča moč se dovaja iz hranilnika vodika, v katerem posledično

količina energije, shranjene energije v obliki vodika, pada, kot sledi iz grafa 'Energija v hranilniku vodika'. Razmere se obrnejo približno po dnevu 70, ko začno dnevni presežki moči prevladovati nad primanjkljaji in se posledično hranilnik vodika začne polniti, kar traja približno do dneva 300.

Tabela 1: Parametri sistema

Površina fotovoltaične elektrarne	100 m ²
Kapaciteta baterije	10 kWh
Največja moč polnjenja baterije	8 kW
Največja moč praznjenja baterije	8 kW
Kapaciteta hranilnika vodika	12000 kWh (cca. 300 kg vodika)
Največja moč elektrolizerja	10 kW
Največja moč gorivne celice	8 kW



Slika 7: Delovanje sistema v obdobju enega leta

Z nastopom zimskega obdobja primanjkljaji zopet začno prevladovati nad presežki in hranilnik vodika se prazni. Celoten sistem mora biti dimenzioniran tako, da je količina energije v hranilniku vodika na koncu leta enaka količini iz začetka leta, kar je ključen pogoj za ponavljajočo se celoletno samozadostnost.

Iz grafa 'Energija v bateriji' je razvidno, da se baterija vsak dan napolni in izprazni. V poletnem obdobju (dan 90...300) se baterija ne izprazni

popolnoma, ker generirana električna moč iz fotovoltaične elektrarne večji delež dneva zadošča pokritje potreb porabnikov. Iz grafa 'Moč vodikovega sistema' je razvidno, da se v poletnem obdobju (dan 100...300) gorivna celica skoraj nikoli ne vklopi, kar pomeni, da se dnevno-nočno balansiranje izvaja le s pomočjo baterije, viški, ki ostanejo, pa se pretvorijo v vodik.

Glavni cilj dimenzioniranja je, da sistem samozadosten in da torej ne jemlje električne energije iz omrežja, vendar se to v redkih trenutkih v zimskem obdobju vseeno zgodi. Do tega pride, kadar moči iz baterije in gorivne celice skupaj ne zmoreta pokriti primanjkljaj generirane moči do porabljene. Razlog za odjem iz omrežja torej večinoma ni pomanjkanje zaloge shranjene energije, pač pa nezadostna skupna instalirana moč baterije in gorivne celice. To bi lahko rešili s povečanjem moči predvsem gorivne celice, a bi to povečalo ceno sistema poslabšalo ekonomiko obratovanja temo celotnega leta. Druga, primernejša rešitev bi bila omejitev porabe fleksibilnih porabnikov v stavbi, to so ogrevalne in hladilne naprave.

Iz grafa 'Moč omrežja' izhaja, da odjema iz omrežja skorajda ni in tudi dovajanje v omrežje je minimalno, kar je bil cilj načrtovanja.

6 Zaključek

Vodikov sistem v kombinaciji z baterijo predstavlja asistenco pri uporabi lokalnih obnovljivih virov energije, v konkretnem primeru fotovoltaične elektrarne, saj omogočata shranjevanje energije za potrebe izravnave časovnega neskladja med generirano in porabljeno električno močjo v stavbi tako kratkoročno (dan/noč), kot tudi dolgoročno (poletno/zimsko obdobje). Simulacijski eksperimenti prikazujejo, da je možno potrebe po električni energiji v stanovanjski stavbi v celoti pokriti s fotovoltaično elektrarno in prigradenim vodikovim sistemom.

Razviti simulacijski model predstavlja zelo uporabno orodje za podporo projektiranju in odločanju, saj omogoča eksperimentalno določitev optimalnih parametrov sistema (velikost fotovoltaične elektrarne, kapaciteto in moč baterije, moč elektrolizerja, moč gorivne celice in kapaciteto hranilnika vodika) ter demonstracijo delovanja sistema. Delovanje sistema lahko ovrednotimo z različnimi kriterijskimi funkcijami, ki so lahko npr. investicijski stroški, cena preskrbe z električno in toplotno energijo, stopnja izkoriščenosti generirane fotovoltaične energije, število vklopov in izklopov elektrolizerja ter gorivne celice in mnogi drugi kriteriji ter njihove kombinacije.

V splošnem je mogoče celoletno samozadostno energetsko oskrbo doseči z različnimi kombinacijami parametrov. Analitična določitev optimalne kombinacije parametrov zaradi kompleksnosti modela in nelinearnih relacij ni možna, potrebna je uporaba optimizacijskih metod. V praksi nas zanimajo predvsem tiste kombinacije parametrov, ki vodijo v najnižje

investicijske stroške, ki so neposredno odvisni od velikosti oziroma moči posameznih komponent sistema. Zato bomo v prihodnosti metodologijo nadgradili z ekonomskim modelom, ki bo ocenil investicijske in obratovalne stroške v odvisnosti od parametrov sistema ter obratovalne stroške glede na način delovanja in posledično obrabo oziroma degradacijo sistema. Razvili bomo tudi avtomatski optimizacijski algoritem, ki bo poiskal optimalne parametre sistema glede na izbrano kriterijsko funkcijo, ki je, kot omenjeno, lahko npr. cena celoletne preskrbe z električno in toplotno energijo ali poljubna druga cenilka ali kombinacija več cenilk.

Zahvala

Delo je bilo podprto z raziskovalnim programom P2-0001 in raziskovalnim projektom L2-4456, oba sta financirana s strani Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije. Za podporo se zahvaljujemo.

Literatura

- [1] P. Puranen, A. Kosonen, J. Ahola, Technical feasibility evaluation of a solar PV based off-grid domestic energy system with battery and hydrogen energy storage in northern climates, *Solar Energy*, Vol. 213, 2021, pp. 246-259.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.089>
- [2] S. R. Vosen, J. O. Keller, Hybrid energy storage systems for stand-alone electric power systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 24, Issue 12, 1999, pp. 1139-1156.
[https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00175-X](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00175-X)
- [3] W. Zhang, A. Maleki, M. A. Rosen, J. Liu, Optimization with a simulated annealing algorithm of a hybrid system for renewable energy including battery and hydrogen storage, *Energy*, Vol. 163, 2018, pp. 191-207.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.112>
- [4] Guoming Yang, Hao Zhang, Wenting Wang, Bai Liu, Chao Lyu, Dazhi Yang, Capacity optimization and economic analysis of PV-hydrogen hybrid systems with physical solar power curve modeling, *Energy Conversion and Management*, Vol. 288, 2023, 117128.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117128>
- [5] M. Kleinebrahm, J. M. Weinand, E. Naber, R. McKenna, A., W. Fichtner, Two million European single-family homes could abandon the grid by 2050, *Joule*, Vol. 7, Issue 11, 2023, pp. 2485-2510.
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.012>