

Idejno rešenje za unapređenje sistema za napajanje elektrolizera i proizvodnju vodonika

Nikola Kovačević¹, Kristina Lazović², Milorad Igić¹, Sava Dobričić¹

¹Univerzitet u Beogradu Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

²Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija
nikola.kovacevic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je prikazano realizovano rešenje za napajanje alkalnog elektrolizera za proizvodnju vodonika i dat je predlog njegovog unapređenja. Povezivanjem fotonaponskih panela, preko dc-dc konvertora direktno na jednosmernu stranu postojećeg dvanaestopulsnog ispravljača, moguće je ostvariti uštedu električne energije, neophodnu za proizvodnju vodonika procesom alkalne elektrolize. Data su merenja električnih veličina postojećeg sistema za napajanje, kao i simulacija rada unapređenog sistema i predlog za njegovo efikasnije upravljanje. Vodonik dobijen korišćenjem energije iz obnovljivih izvora, u procesu elektrolize, jeste zeleni vodonik koji će biti značajan energent u budućnosti i okosnica energetske tranzicije.

Ključne reči: vodonik, alkalna elektroliza, pretvarači, obnovljivi izvori energije

1. Uvod

Proizvodnja vodonika u svetu, sve više dobija na značaju, jer je prepoznat kao „zeleno“ gorivo budućnosti. U kombinaciji sa obnovljivim izvorima energije, treba da predstavlja okosnicu nove energetske tranzicije i pomogne u dekarbonizaciji elektroenergetskog sistema. Postoji mnogo načina za dobijanje vodonika, a jedan od njih je elektroliza vode. Predviđanja su da će oko 2050. godine, 60 % od ukupne proizvodnje vodonika, biti dobijeno baš elektrolizom vode [1]. Alkalna elektroliza upotrebom kalijum-oksida je od posebnog interesa za ovaj rad. U ovom trenutku, najviše vodonika se dobija iz fosilnih goriva i uglja (oko 95%) uglavnom kao nusprodukt drugih procesa [2].

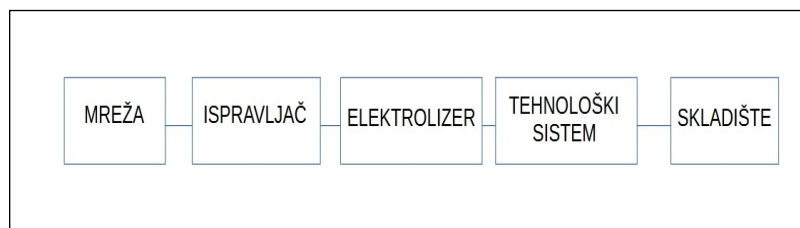
Danas se manje od 1% vodonika dobija elektrolizom vode, stoga je prostor za omasovljenje ove proizvodnje značajan [3]. Vodonik koji je dobijen korišćenjem energije iz obnovljivih izvora u elektrolizi vode, je zapravo zeleni vodonik, koji je označen kao energent budućnosti. Kao takav, vodonik bi se koristio kao gorivo u transportu, kao energent za grejanje, u industriji metala, hemijskoj industriji, rafinerijama...

Značajnu ulogu u procesu alkalne elektrolize imaju energetski pretvarači koji se koriste za napajanje elektrolizera. Kako elektroliza podrazumeva propuštanje jednosmerne struje između anode i katode, koje su uronjene u vodu (sa određenim hemijskim dodacima), može se zaključiti da su ispravljači u opštem slučaju, glavni izvor napajanja elektrolizera (uređaj koji sadrži redno naslagane setove anoda i katoda, uronjenih u vodeni rastvor). Sami pretvarači se, u opštem slučaju, dele na jednostepene i dvostepene [1]. Jednostepeni prevarači su AC-DC pretvarači, dok su dvostepeni pretvarači redna veza AC-DC (ispravljača) pretvarača i DC-DC pretvarača (čopera).

2. Elektrolizna stanica za proizvodnju vodonika

Elektrotehnički institut Nikola Tesla je izradio i pustio u rad ispravljače za napajanje elektrolizera u elektroliznoj stanici za potrebe proizvodnje vodonika i hlađenje sinhronih generatora [3].

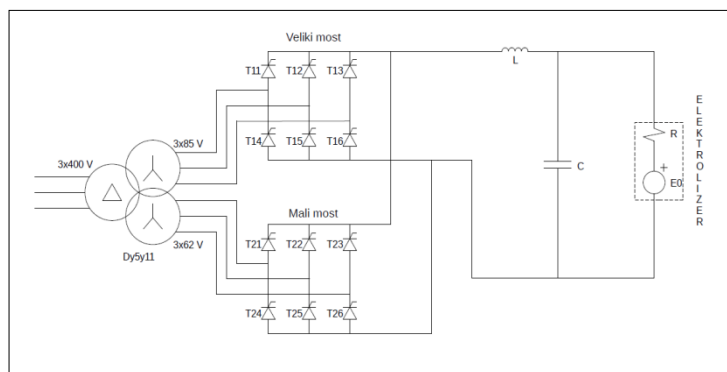
Ceo sistem elektrolizne stanice (postrojenja za proizvodnju vodonika) se sastoji od dva identična dvanaetopulsna ispravljača, dva alkalna elektrolizera, tehnološkog sistema i rezervoara za skladištenje vodonika. Strukturna blok šema elektrolizne stanice je prikazana na slici 1.



Slika 1. Blok šema postrojenja za proizvodnju vodonika.

2.1 Ispravljač

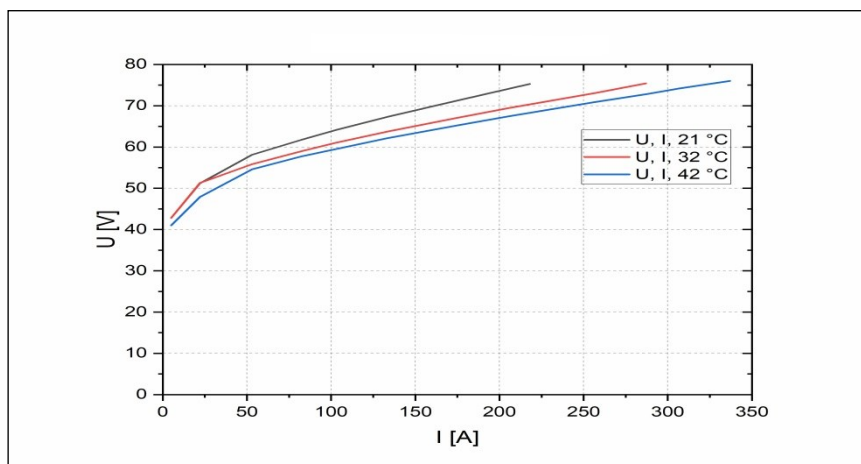
Tiristorski dvanaestopusni ispravljač sastoji se od tronamotnog transformatora, koji napaja dva tiristorska mosta (veliki i mali most) koji nejednako dele struju opterećenja (elektrolizera) [3]. Sekundar i tercijer transformatora čine dve zvezde sa različitim vrednostima međufaznog napona. Na izlazu iz mostova, koji su paralelno vezani, postoji LC filter za smanjenje ripla struje i napona. Principijelna šema ispravljača je prikazana na slici 2. Specifičnost ove topologije je i u tome što ne poseduje interfaznu prigušnicu između dva tiristorka mosta.



Slika 2. Prikaz topologije ispravljača sa pripadajućim modelom elektrolizera.

2.2 Alkalni elektrolizer

Svaki ispravljač napaja svoj alkalni elektrolizer koji se sastoji od 30 ćelija. U njemu se nalazi vodeni rastvor kalijum-hidroksida. Statička UI karakteristika jednog od dva identična elektrolizera je predstavljena na slici 3. Snimana je za tri različite temperature elektrolizera (21 °C, 32 °C i 42 °C). Može se uočiti da je ona temperaturno zavisna, kao i da ima rezistivnu prirodu. Elektrolizer se može dovoljno dobro modelovati kao redna veze elektromotorne sile i otpornosti (koja predstavlja strminu statičke karakteristike) za datu temperaturu elektrolita. Izgled alkalnog elektrolizera dat je na slici 4.



Slika 3. Statička karakteristika alkalnog elektrolizera pri različitim temperaturama.



Slika 4. Izgled alkalnog elektrolizera.

2.3 Tehnološki sistem

Tehnološki sistem se sastoji od razvodnih kolona (služe za odvajanje gasova od elektrolita kao i za hlađenje elektrolita), isparivača gasa, agregata za hlađenje freonom, regulatora pritiska gasa, rezervoara baze itd. Ceo sistem je namenjen za tehnološki proces elektrolize, a kao finalni proizvod, dobijaju se izdvojeni vodonik i kiseonik. Vodonik se zatim skladišti u tankove (resivere), dok se kiseonik pušta u atmosferu.

2.4 Skladište

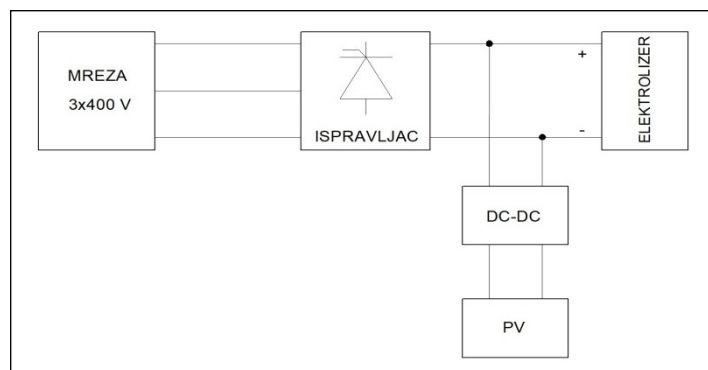
Dobijeni vodonik se skladišti u velikim tankovima (resiverima) koji se nalaze ispred objekta (elektrolizne stanice) i kao takav se koristi za hlađenje obrtnih mašina. Tankovi se pune nekoliko dana (3-7 dana neprekidnog rada elektrolizera), u zavisnosti od tehnološkog procesa i broja elektrolizera u radu.

2.5 Opis rada

Kada se u potpunosti pripremi tehnološki sistem (cevovod očisti azotom, pripremi elektrolit i ulije u elektrolizer, izbací vazduh iz tankova itd), ispravljači startuju na komandu rukovaoca koji zada referencu željene jednosmerne struje. Rukovalac najčešće zadaje struju od 330 A. Statička karakteristika alkalnog elektrolizera je temperaturno zavisna, kao što je prikazano na slici 3. Kada je elektrolizer hladan, regulator ispravljača polako podiže referencu struje dok ne dostigne limit napona od 75V. Tada se održava napon, dok struja postepeno raste kako se elektrolizer zagreva. Zagrevanje elektrolizera bi značilo da se za napon od 75 V prelazi sa jedne karakteristike na drugu što odgovara različitim strujama elektrolizera za različite temperature (stuja raste kada se elektrolizer zagreva). Ispravljač je projektovan tako da reguliše struju a da ograničava napon na maksimalnih 75 V. Željena radna tačka je 75V i 330 A. Tada se na izlazu ima najčistiji vodonik (preko 99.5%) koji je spreman za skladištenje. Proces zagrevanja elektrolizera do željenih 42 °C traje nekoliko sati (oko 3-4h) zbog velikih termičkih konstanti. Brzina zagrevanja elektrolizera zavisi od struje koja kroz njega protiče, temperature i protoka vodenog rastvora koji se kroz njega propušta, kao i temperature ambijanta oko elektrolizera. Kako postoje dva ispravljača i dva alkalna elektrolizera (identičnih karakteristika), za nesmetan rad elektrolizne stanice, dovoljno je da radi jedna grupa ispravljač-elektrolizer, dok druga grupa predstavlja rezervu.

3. Idejno rešenje za unapređenje napajanja elektrolizera

Kako bi se povećala efikasnost samog postrojenja, i smanjila potrošnja električne energije, dat je predlog za postavljanje mini solarne elektrane sa DC-DC pretvaračem (čoperom), koji bi se povezao na jednosmernu stranu postojećeg ispravljača i elektrolizera (jedne grupe ispravljač-elektrolizer). Pretvarač bi doprinosio ukupnoj struji elektrolizera i smanjivao jednosmernu struju ispravljača, a samim tim i struju koja se uzima iz mreže (pri istim dosadašnjim naponskim prilikama). Principijelna blok šema je prikazana na slici 5.



Slika 5. Blok šema ispravljača sa dodatkom solarne elektrane preko čopera u jednosmerno kolo za napajanje elektrolizera.

3.1 Proračun solarne elektrane

Na lokaciji na kojoj se nalazi elektrolizna stanica, predviđena je izgradnja male solarne elektrane, koja bi se nalazila na krovu objekta. Lokacija od interesa se nalazi u istočnoj Bosni i Hercegovini.

Krov je ravan, dimenzija 12x12 m, ukupne površine 144 m². Na ravnim krovovima je zbog estetskih razloga, ali i slivanja kišnice uobičajen način postavljanja fotonaponskih modula tzv. A-dome, nagib 3° (slika 6). Ovaj način je koristan i zbog izbegavanja međusobnog senčenja koje se može imati prilikom postavljanja panela pod većim nagibom. U neposrednoj blizini objekta nema drveća ili drugih visokih objekata, koji bi mogli uzrokovati zasenčenje modula.

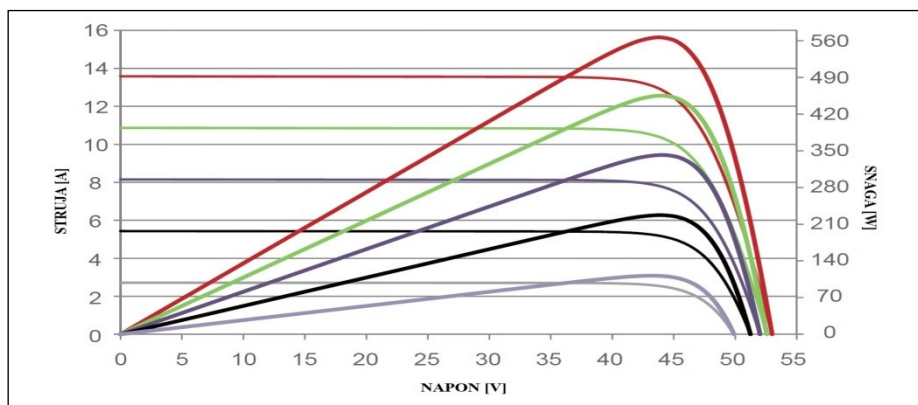


Slika 6. Način postavljanja fotonaponskih modula u A-dome konfiguraciju.

U okviru idejnog rešenja, odabran je fotonaponski modul proizvođača Jinkosolar JKM-565M-7RL4-V, snage **565 Wp** [4], osnovnih tehničkih karakteristika:

- napon praznog hoda: 53.2 V
- struja kratkog spoja: 13.53 A
- efikasnost modula SOC: 20.67 %
- dimenzije modula: 2411×1134×35 mm

Strujno-naponska i karakteriska napon-snaga, posmatranog modula pri različitim nivoima insolacije, je prikazana na slici 7.

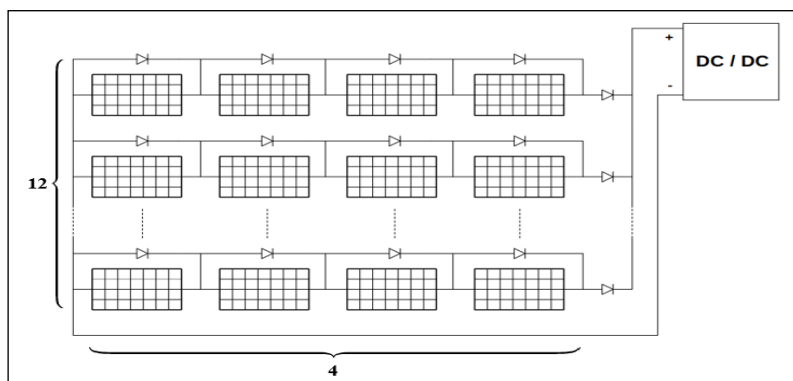


Slika 7. Strujno-naponska i karakteristika napon- snaga odabranog modula pri različitim insolacijama.

DC/DC pretvarač sa slike 5 je uređaj za podešavanje tačke maksimalne snage (eng. *Maximal Power Point Tracking, MPPT*) koji omogućava da se radna tačka fotonaponskih modula održava u kolenu strujno-naponskih karakteristika pri promeni radnih uslova u toku dana [5]. Promenom radnog ciklusa (eng. *Duty cycle*) pretvarača, postiže se da se pri održavanju približno konstatnog DC napona na elektrolizeru od 75 V ima maksimalno iskorišćenje solarne energije. Ukoliko snaga solarne elektrane, u datom trenutku, premašuje potrebe elektrolizera, pretvarač će obarati snagu elektrane i time vršiti prilagođenje snage.

Usvajanjem raspoložive površine za postavljanje modula od 132 m² ostavlja se prostor za prolazak osoblja, kabliranje i po potrebi postavljanje drugih objekata na krov, što znači da se na krovu može postaviti 48 odabranih modula. Da bi se dobila adekvatna strujno-naponska karakteristika, moduli su vezani u 12 stringova sa po 4 modula u stringu (slika 8). Samim tim, može se izgraditi solarna elektrana ukupne snage:

$$P_{DC} = 48 \cdot 565 = 27.12 \text{ kWp}$$



Slika 8. Način vezivanja PV modula sa DC/DC pretvaračem.

Za procenu proizvodnje solarne elektrane korišćen je softverski alat Pvsyst [6], koji koristi Meteonorm meteorološku bazu, formira tipičnu godinu u pogledu meteorologije i na osnovu definisanih karakteristika elektrane daje očekivanu proizvodnju sa satnom rezolucijom. U Tabeli 1 su prikazani osnovni mesečni energetske pokazatelji elektrane.

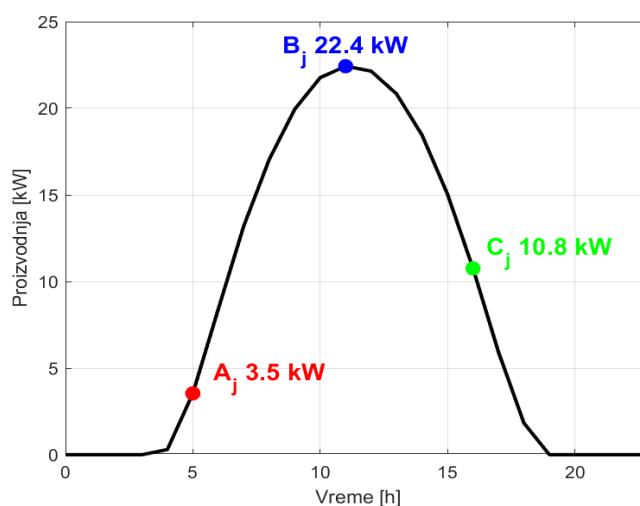
Tabela 1: Energetski pokazatelji rada solarne elektrane.

	Difuzna horizontalna insolacija [kWh/m ²]	Direktna horizontalna insolacija [kWh/m ²]	Dozračena insolacija na površinu panela [kWh/m ²]	Proizvodnja solarne elektrane [kWh]
Januar	22.23	14.2	33	885
Februar	28.97	26.0	51.4	1372
Mart	55.07	43.1	93.8	2452
April	76.83	49.2	121.4	3099
Maj	79.8	82.3	157.5	3888
Jun	87.01	89.3	171.3	4192
Jul	80.34	105.3	180.2	4355
Avgust	75.64	88.7	159.1	3872
September	49.94	60.2	105.6	2640
Oktobar	35.81	43.0	74.2	1899
Novembar	26.77	15.0	38.2	1001
Decembar	17.69	10.6	25.5	676
Godišnja vrednost	636.11	626.7	1211.3	30330

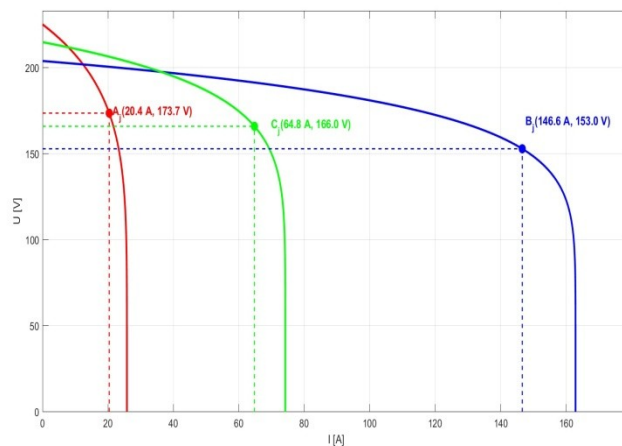
Može se zaključiti sledeće:

- Razmatranu lokaciju karakteriše ukupna godišnja horizontalna insolacija (difuzna + direktna) od 1263 kWh/m² što je prosečan solarni potencijal za prostor BiH.
- Mesec sa najviše očekivane proizvodnje je jul, a najmanje decembar.
- Analizom rezultata sa satnom rezolucijom je zaključeno da je najviša proizvodnja koja se može očekivati 22.4 kW.
- Ukupna godišnja električna energija koju elektrana može da proizvede je 30.33 MWh.

Sa aspekta povezivanja solarne elektrane sa elektrolizerom, biće razmatrani dani sa najviše i najmanje proizvodnje u godini. To su najbolji dan u mesecu julu, kao i najlošiji dan u decembru. Na slici 9 je prikazan očekivani satni dijagram promene maksimalne snage u najproduktivnijem danu u godini. Sa dijagrama se može videti da je maksimalna očekivana snaga koju može dati predložena solarna elektrana 22.4 kW (Tačka B_j sa grafika). Pored tačke maksimuma, na istom grafiku su predstavljene i još dve, jedna na početku svetlog dela dana (tačka A_j) a druga na kraju svetlog dela dana (tačka C_j). Na slici 10 su prikazane UI karakteristike za tačke maksimalne snage A_j, B_j i C_j.

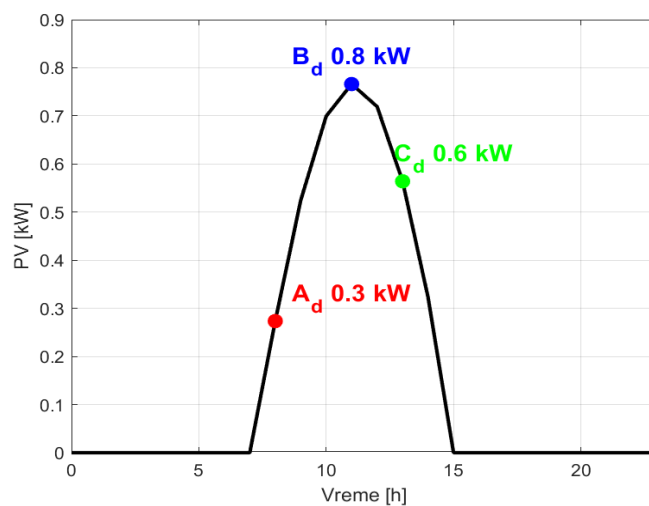


Slika 9. Očekivani satni dijagram promene maksimalne snage u najproduktivnijem danu u godini - julski dan.

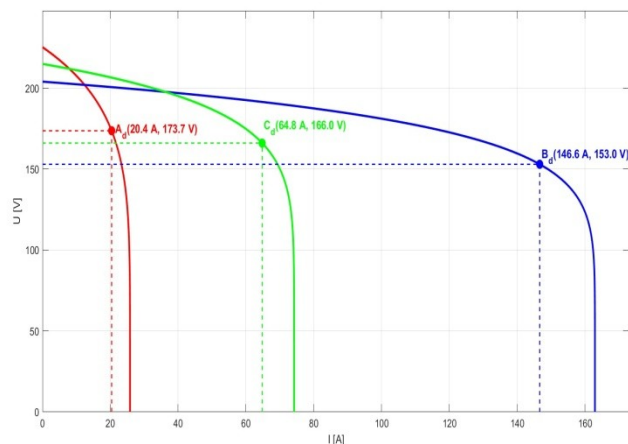


Slika 10. UI karakteristike za karakteristične tačke, u najproduktivnijem danu u godini - julski dan.

Kako bi se u analizi uvažili krajnji radni režimi sa aspekta doprinosa snage, razmatran je i decembarski dan sa najmanjom proizvodnjom (slika 11), sa svojim karakterističnim tačkama snage (A_d , B_d i C_d). Na slici 12 su prikazane UI karakteristike za tačke maksimalne snage A_d , B_d i C_d .



Slika 11. Očekivani satni dijagram promene maksimalne snage u danu sa najmanjom proizvodnjom u godini - decembarski dan.

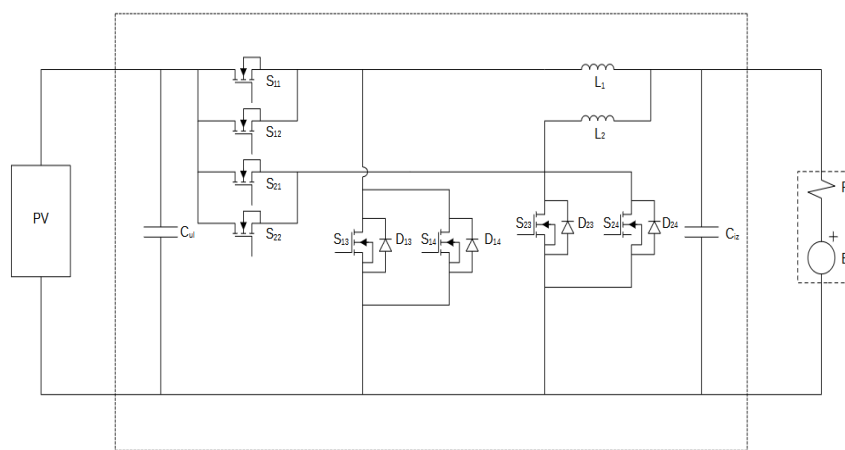


Slika 12. U-I karakteristike za karakteristične tačke, u danu sa najmanjom proizvodnjom u godini - decembarški dan.

3.2 Pretvarač za solarne panele

Kako bi se energija iz solarnih panela prenela do elektrolizera, neophodno je imati pretvarač koji je sposoban da nelinearnu karakteristiku solarnih panela, kao i nelinearnu karakteristiku elektrolizera uskladi i omogući prenos energije. Kako je optimalna radna tačka elektrolizera ona za koju se ima struja od 330A i napon od 75 V pri temperaturi elektrolizera od 42 °C, pretvarač mora biti prema njoj dimenzionisan. Kako je struja koju daju solarni paneli niska (oko 13 A) a napon zadovoljavajući (oko 50 V) izabran je pretvarač spuštač napona (eng. *Buck converter*). Solarna elektrana i pretvarač su odabrani tako da se smanji izlazna struja elektrane dok bi se išlo na njen nešto viši izlazni napon. Očekivana vrednost struje koju može dati pretvarač je 330 A pri naponu od 75 V. Za ovako veliku struju, neophodno je imati više paralelnih grana unutar pretvarača (više kanalni pretvarač) kao i paralelne tranzistore u jednoj grani. Stoga je odabrana konfiguracija, sa dve grane i pomećenim upravljanjem između dve grane (eng. *interleaved*). U svakoj grani postoje po dva paralelna tranzistora na visokonaponskoj strani (prva grana $S_{11}+S_{12}$, druga grana $S_{21}+S_{22}$) i po dva paralelna tranzistora na niskonaponskoj strani (prva grana $S_{13}+S_{14}$, druga grana $S_{23}+S_{24}$). Paralelni tranzistori se pale istovremeno i neophodni su kako bi se podelila struja opterećenja jedne grane. Topologija pretvarača je prikazana na slici 13. Upravljanje impulsima za paljenje tranzistora ($S_{11}+S_{12}$ i $S_{21}+S_{22}$) različitih grana su pomećeni za $360^\circ/n$ (gde je n broj grana). U ovom slučaju je to 180° ($n=2$). U vremenskom intervalu, pomeraj odgovara $T/2$. Gde je T perioda

prekidanja. Takođe, upotreba višekanalne konfiguracije i *interleaved* upravljanja smanjuje valovitost izlazne i ulazne struje u odnosu na standardnu jednokanalnu konfiguraciju.



Slika 13. Konfiguracija Buck pretvarača.

Kako maksimalni napon na izlazu pretvarača mora biti jednak maksimalnom naponu elektrolizera 75V, a napon na ulazu varira oko 150 V (u tačkama maksimalne snage solarne elektrane), to odgovara stepenu naponske konverzije od približno 2:1. Očekivani radni ciklus D (eng. Duty cycle) je oko 0.5 u željenoj radnoj tački, što za posledicu ima skoro upola manju struju koja se uzima iz solarnih modula. Zbog ranije pomenute konfiguracije solarne elektrane i očekivanog odnosa ulaznog i izlaznog napona, pretvarač sa dve grane i interleaved upravljanjem, predstavlja bolje rešenje nego jednokanalni pretvarač.

Pretvarač mora ispunjavati sledeće:

1. Talasnost izlaznog napona: <2% (eng. peak to peak)
2. Talasnost izlazne struje: <2% (eng. peak to peak)
3. Talasnost ulazne struje: <5% (eng. peak to peak)
4. Frekvencija prekidanja: 50 kHz
5. Snaga pretvarača: 30 kW
6. Opseg ulaznog napona: 0-200 V
7. Opseg izlaznog napona: 0-80 V

Cilj je da pretvarač ima mali ripl napona (struje) na svom izlazu. Proizvodnja vodonika je direktno srazmerna sa srednjom vrednosti struje dok su gubici u elektrolizeru srazmerni sa kvadratom efektivne vrednosti struje. Dakle ripl struje samo učestvuje u povećanju gubitaka dok uopšte ne

učestvuje u proizvodnji vodonika, i time smanjuje efikasnost alkalnog elektrolizera. Stoga ripl struje elektrolizera (a samim tim i izlazne struje pretvarača) treba da bude što manji (recimo ispod 2%, ne postoji precizirana vrednost u literaturi).

Standardna topologija *Buck* pretvarača (jednokanalnog ili višekanalnog) ima jedan tranzistor i zamajnu diodu (eng. *Freewheeling diode*) u svakoj grani. Kada se zamajna dioda zameni MOSFET tranzistorom sa paralelnom diodom ($S_{13}+S_{14}$ i $S_{23}+S_{24}$, slika 13), tada se podiže efikasnost pretvarača jer MOSFET tranzistor ima manje gubitke prilikom vođenja od diode.

Dva paralelna tranzistora na visokonaponskoj strani prve grane se pale istovremeno ($S_{11}+S_{12}$), tada struja kroz prigušnicu L_1 raste. Nakon njihovog isključenja, postoji mrtvo vreme između gašenja tranzistora na visokonaponskoj strani i uključenja tranzistora na niskonaponskoj strani ($S_{13}+S_{14}$). Mrtvo vreme služi kao vid zaštite, da ne dođe do njihovog istovremenog provođenja i pravljenja kratkog spoja. Tokom trajanja mrtvog vremena, provode diode koje su paralelne sa niskonaponskim tranzistorima prve grane, i struja kroz prigušnicu L_1 opada. Nakon isteka mrtvog vremena, uključuju se paralelni tranzistori na niskonaponskoj strani i preuzimaju struju od dioda. Alternativno, nakon perioda $T/2$ od paljenja tranzistora na visokonaponskoj strani prve grane, pale isti tranzistori druge grane i njihov ciklus rada na dalje je identičan kao u prvoj grani.

Pretvarač treba da poseduje merenje izlazne sopstvene struje i napona kao i ukupne struje elektrolizera. Posедуje i merenje ulazne struje i ulaznog napona. Upravljanje zahteva primenu izlaznih strujno-naponskih limitera od 75 V i 330 A, dok je algoritam za praćenje tačke maksimalne snage solarne elektrane, poznat kao *Hill-climbing*, dovoljno dobar za ovu implementaciju. Uz upotrebu Silicijum-karbidnih (SiC) tranzistora, procena je da bi ovakav pretvarač mogao imati stepen korisnog dejstva od 97%.

4. Analiza rada predloženog rešenja

Konfiguracija ispravljač-čoper (DC-DC pretvarač) je predviđena da radi na sledeća dva načina:

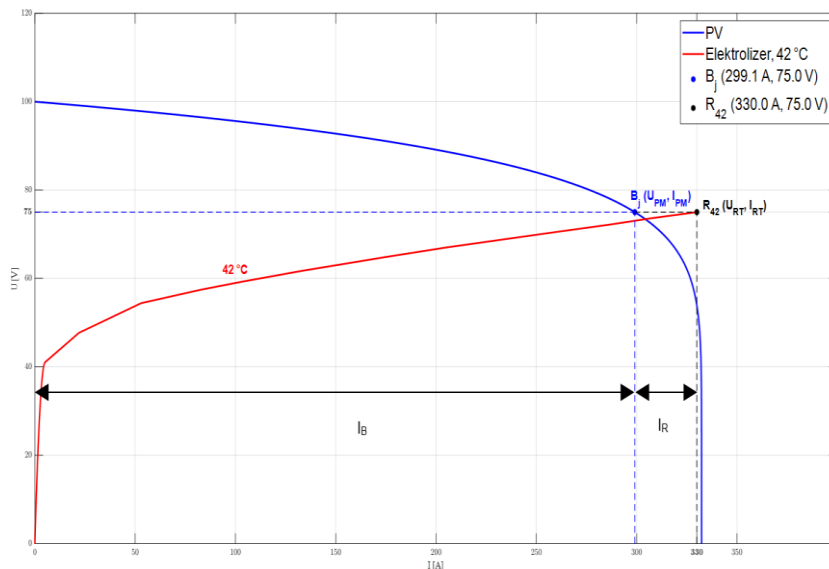
1. U radu može biti samo ispravljač (postojeće rešenje)
2. U radu mogu biti zajedno ispravljač i čoper (predloženo rešenje)

4.1 Rad elektrolizera sa ispravljačem i DC-DC pretvaračem

Prilikom dimenzionisanja male solarne elektrane, koja može stati na krov elektrolizne stanice, proračunato je da je maksimalna snaga koja može biti isporučena 22.4 kW. Ukoliko trenutno zanemarimo stepen iskorišćenja DC-

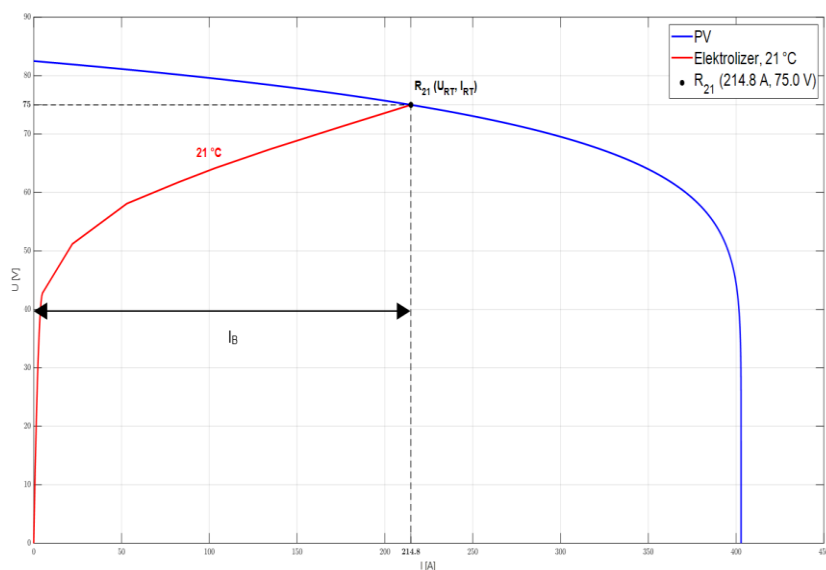
DC pretvarača (koji prelazi 90%, stoga se gubici u njemu mogu i zanemariti u ovoj analizi), grafički se mogu analizirati radni režimi i oceniti kvalitet proračuna solarne elektrane i DC-DC pretvarača. Takođe, može se napisati i najpovoljnija dinamika vođenja postrojenja, sa aspekta rukovaoca, za ostvarenje uštede električne energije. Izmene koje bi se napravile na postojećem ispravljaču bile bi u vidu dodavanja još jednog merenja (dodavanjem senzora i izmene u postojećem softveru) ukupne struje tj. struje elektrolizera. Sadašnje merenje struje koje poseduje bi bilo merenje izlazne struje ispravljača, dok bi merenje ukupne struje bilo merenje koje obuhvata i struju ispravljača i struju DC-DC pretvarača. Ispravljač već poseduje merenje napona. Pretvarač bi takođe posedovao merenje struje koju daje na svom izlazu kao i merenje ukupne struje i napona elektrolizera.

Na slici 14, dat je prikaz UI karakteristike elektrolizera pri temperaturi od 42 °C (prethodno zagrejan elektrolizer), i svedene UI karakteristike solarne elektrane na stranu elektrolizera (UI karakteristika tačke B_j , sa slike 9 i 10) uvažavajući radni ciklus čopera koji je tako prilagođen, da njegova radna tačka odgovara tački maksimalne snage solarne elektrane u tom trenutku (B_j). Gubici u čoperu su prilikom ove analize zanemareni. Radni napon elektrolizera je 75V dok je struja 330 A (tačka R_{42} sa grafika). Sa grafika se može videti da čoper daje struju od 299 A (I_B) dok ispravljač dodaje 36 A (I_R). Dakle u ovom radnom režimu elektrolizera je moguće izvući maksimalnu snagu iz solarne elektrane u naproduktivnijem danu u godini.



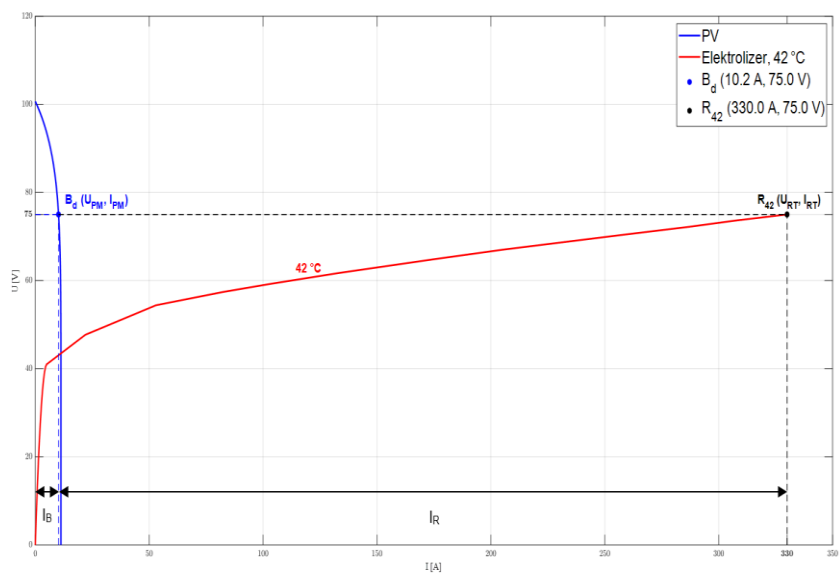
Slika 14. UI karakteristike elektrolizera za 42°C i solarne elektrane na strani elektrolizera u tački B_j najproduktivnijeg dana u godini.

Na slici 15, dat je prikaz UI karakteristike elektrolizera (pri temperaturi od 21 °C, elektrolizer na ambijentalnoj temperaturi), i svedene karakteristike solarne elektrane (UI karakteristika tačke B_j, sa slike 9 i 10) na stranu elektrolizera uvažavajući radni ciklus čopera koji je tako prilagođen, da se ne prekorači napon elektrolizera od 75 V. Gubici u čoperu su prilikom ove analize zanemareni. Radni napon elektrolizera je 75V dok je struja oko 215 A (tačka R₂₁ sa grafika). Sa grafika se može videti da čoper daje svu struju koju elektrolizer može da primi (I_B) i da ispravljač u ovom slučaju ne mora da doprinosi ukupnoj struji elektrolizera. Za postizanje radne tačke R₂₁, prilikom najproduktivnijeg dana u godini, a prilikom starta elektrolizera iz hladnog stanja (na temperaturi ambijenta), neophodno je da čoper obara snagu solarne elektrane i radi mimo tačke maksimalne snage.

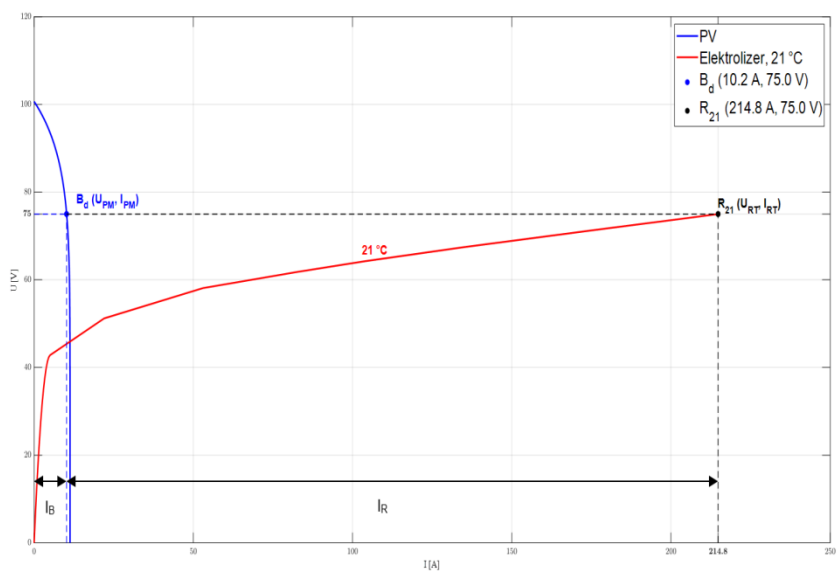


Slika 15. UI karakteristike elektrolizera za 21°C i solarne elektrane na strani elektrolizera u tački B_j najproduktivnijeg dana u godini.

Na slici 16 i 17, dati su prikazi UI karakteristika elektrolizera pri temperaturama od 42°C i 21 °C, respektivno, i svedene karakteristike solarne elektrane (UI karakteristika tačke B_d sa slike 11 i 12) uvažavajući radni ciklus čopera koji je tako prilagođen, da njegova radna tačka odgovara tački maksimalne snage u tom trenutku (B_d). Gubici u čoperu su prilikom ove analize zanemareni. Radni napon elektrolizera je 75V dok je struja 330 A (slika 16, tačka R₄₂) i oko 215 A (slika 17, tačka R₂₁). Sa grafika se može videti da ispravljač dodaje značajni deo ukupne struje elektrolizera (I_R), dok je udeo struje čopera neznatan (I_B) .



Slika 16. UI karakteristike elektrolizera za 42°C i solarne elektrane na strani elektrolizera u tački B_d najmanje produktivnog dana u godini.



Slika 17. UI karakteristike elektrolizera za 21°C i solarne elektrane na strani elektrolizera u tački B_d najmanje produktivnog dana u godini.

Analizom predhodnih grafika, koji predstavljaju krajnje granice rada sistema (koji čine solarna elektrana, čoper, ispravljač i elektrolizer), moguće je konstatovati da postoji prostor za implementaciju ovakve vrste poboljšanog napajanja elektrolizera. Adekvatnim upravljanjem čopera, moguće je maksimalno iskoristi energiju solarne elektrane, koja je promenljiva u vremenu, i u paru sa postojećim tiristorskim ispravljačem omogućiti nesmetanu proizvodnju vodonika bez prekoračenja dozvoljenih limita elektrolizera. Doprinos solarne elektrane u julu mesecu je značajan, dok je u decembru vrlo nizak. Analizom ova dva slučaja za tačke maksimalne snage B_j i B_d , može se zaključiti da će i u ostalim delovima dana analiziranih na graficima 9 i 11 (tačke A_j , C_j , A_d i C_d) doprinos biti unutar krajnjih granica rada celog sistema.

4.2 Predlog za rukovanje

Kako današnje potrebe postojeće elektrolizne stanice, omogućavaju fleksibilnost i izbor vremenskog intervala rada, moguće je predložiti najbolju dinamiku kojom bi se ovo unapređeno postrojenje sa solarnom elektranom koristilo.

Tankovi za čuvanje vodonika se mogu puniti u bilo koje doba dana, u zavisnosti od nivoa vodonika u njima, jer je elektrolizna stanica pokrivena rukovaocima 0-24h. Dosadašnja praksa je pokazala da kada rukovaoci startuju ispravljač i elektrolizer, oko 3-4 sata je potrebno da elektrolizer od ambijentalne temperature postigne sopstvenu temperaturu od oko 42 °C i krene sa proizvodnjom vodonika koji je kvalitetom spreman za skladištenje. Tako zagrejan elektrolizer, može ostati u radu i nekoliko dana u zavisnosti od nivoa vodonika u tankovima. Za ostvarenje uštede energije, primenom sistema koji je opisan uradu, sistem treba startovati u svetlom delu dana u jutarnjim časovima kako bi se maksimalno iskoristila sunčeva energija tokom dana. Tada bi se broj dana rada elektrolizera povećao (dva do tri puta), jer bi radili samo tokom svetlog dela dana (a ne 24h u danu), ali takva dinamika je u potpunosti moguća. Ovakvim rukovanjem se može uštedeti od 3.9 kWh (najmanje produktivan dan solarne elektrane, površina ispod grafika sa slike 11) do 201.6 kWh (najproduktivniji dan solarne elektrane, površina grafika sa slike 9) po jednom danu upotrebe. Najveće uštede se ostvaruju u letnjim mesecima.

4.3 Tehno-ekonomska analiza predloženog rešenja

Cilj ekonomske analize je da se dobije odgovor na pitanje da li je opravdano ulaganje u fotonaponski sistem koji bi napajao elektrolizer na

način koji je u radu izložen. Ekonomski benefit koji se ima od PV sistema se ogleda u uštedama na račun manje preuzete električne energije iz mreže.

Pokazatelj $LCOE$ (eng. *Levelized Cost of Electricity*) ima značenje aktuelizovanog troška proizvodnje jedinične energije iz fotonaponskih sistema [7]. Standardnu formulu za $LCOE$ smo modifikovali, uzimajući u obzir stepene korisnog dejstva čopera i ispravljača, i definisali $LCOE_{eff}$ na sledeći način:

$$LCOE_{eff} = \frac{C_I + \sum_{n=1}^N \frac{C_{O\&M}}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{W_1 \cdot 0.97 / 0.86 \cdot (1 - (n-1) \cdot p_{\%} / 100)}{(1+i)^n}} \quad [€ / MWh]$$

U prethodnom izrazu, i je stopa diskontovanja (uobičajeno oko 5%), N životni vek PV sistema, C_I izgradnje PV sistema, C_{pret} je cena pretvarača, $C_{O\&M}$ su operativni troškovi (održavanje, čišćenje panela...), W_1 predstavlja proizvedenu električnu energiju u prvoj godini eksploatacije, koja se nakon toga smanjuje za $p_{\%}$ procenata svake godine usled degradacije modula. Gornja formula se razlikuje od standardne formule za $LCOE$ faktor, po tome što su u obzir uzeti stepeni korisnog dejstva čopera (0.97 r.j.) i postojećeg ispravljača (0.86 r.j., prema [3]). Ovo se može objasniti sledećim rezonom: Ako solarna elektrana proizvede 100 kWh, gubici u čoperu su 3 kWh, što dovodi do toga da je energija predata elektrolizeru 97 kWh. Za identičnu predatu energiju elektrolizeru, ispravljač iz svoje napojne mreže mora preuzeti 112.8 kWh. Dakle na 100 kWh dobijenih iz solarne elektrane, štedi se 112.8 kWh iz napojne mreže ispravljača.

Odluku o isplativosti investiranja u PV sistem treba doneti na osnovu poređenja $LCOE_{eff}$ pokazatelja i cene električne energije (bilo da je ona preuzeta iz distributivne mreže ili dobijena iz sopstvene potrošnje termoelektrane). Ako je $LCOE_{eff}$ manji, onda je investicija opravdana, i obrnuto. Usvojene ulazne vrednosti su dobijene na osnovu analize tržišta, tehničke specifikacije modula i iskustva eksperata i izložene su u sledećoj tabeli.

Tabela 2: Vrednosti usvojenih parametara za procenu $LCOE_{eff}$ faktora.

C_I [€]	14 000
C_{pret} [€]	5 000
$C_{O\&M}$ [€ / god]	300
$p_{\%}$ [%/god]	0,55
N [god]	25

Kako nije unapred poznato koji deo proizvodnje PV sistema će biti iskorišćen za napajanje elektrolizera, razmotrene su tri varijante rada:

- A. Elektrolizer se napaja iz PV sistema kad god ima proizvodnje, tj, W_1 je ukupna godišnja proizvedena energija, tj. 30.33 MWh.

$$LCOE_{eff}=50,3 \text{ €/MWh}$$

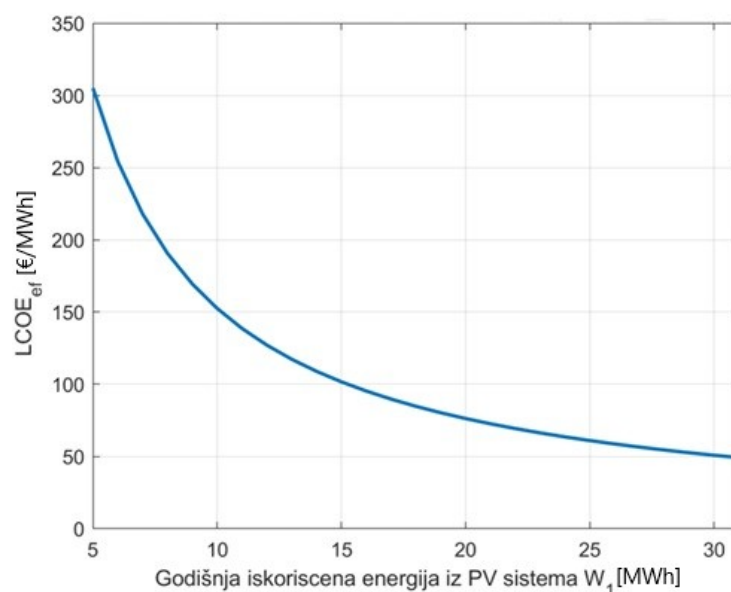
- B. Elektrolizer se napaja iz PV sistema samo tokom jedne nedelje mesečno, odnosno W_1 je zbirna proizvodnja PV sistema tokom prosečne nedelje svakog meseca, što iznosi 6.96 MWh.

$$LCOE_{eff}=219,3 \text{ €/MWh}$$

- C. Elektrolizer se napaja iz PV sistema tokom dve nedelje mesečno, odnosno W_1 je zbirna proizvodnja PV sistema tokom prosečne nedelje svakog meseca, što iznosi 13.92 MWh.

$$LCOE_{eff}=110,1 \text{ €/MWh}$$

Potpuno iskorišćenje energije iz PV sistema dovodi do toga da je ova investicija opravdana ukoliko su cene preuzete električne energije veće od oko 50,3 €/MWh, što je dosta niska vrednost. Realnije je očekivati da će samo deo energije iz panela moći da se iskoristi. Slika 18 pokazuje zavisnost $LCOE_{eff}$ pokazatelja od W_1 . U interesu je investitoru da što češće elektrolizer napaja iz PV sistema, jer će onda ušteda na račun preuzete energije biti veća, pa i projekat opravdaniji. Projekat ima ekonomsku opravdanost ako se PV sistem koristi više od dve nedelje u mesecu. Moguće je napajati elektrolizer samo tokom svetlog dela dana, i tada bi za punjenje skladišta bilo potrebno nekoliko nedelja, stoga ovakav predlog napajanja jeste ekonomski isplativ. Očekuje se da, u budućnosti, budu uvedene velike takse za emisiju CO₂, tada će ovaj projekat biti isplativ i za manje od dve nedelje rada elektrolizera u mesecu.



Slika 18. Zavisnost $LCOE_{eff}$ pokazatelja od godišnje iskorišćene energije PV sistema.

4.4 Uticaj na smanjenje emisije CO_2

Ekološki benefit izgradnje PV sistema se ogleda u smanjenoj emisiji štetnih gasova koji nastaju proizvodnjom električne energije u termoelektranama na ugalj, u ovom slučaju lignit. Na osnovu podataka izloženih u [5] koji se odnose na prosečne emisije štetnih neradioaktivnih gasova pri proizvodnji električne energije iz različitih izvora, procenjuje se da je u termoelektranama na lignit prosečna emisija CO_2_{ekv} (CO_2 je referentni gas za globalno zagrevanje) 1114.4 kg/MWh, dok je za solarne elektrane ova vrednost 56.8 kg/MWh. Navedene vrednosti predstavljaju ekvivalentne emisije u koje su uključene i emisije koje su prouzrokovane proizvodnjom elemenata elektrane i njihovom montažom. To znači da se za svaki proizveden MWh iz PV sistema, uštedi u emisiji CO_2 oko 1.05 tona CO_2_{ekv} . Ukoliko bi sva energija iz PV sistema bila upotrebljena, to bi dovelo do uštede od približno 32 tona CO_2_{ekv} , dok bi za manje iskorišćenje solarne energije, uštede u štetnim gasovima bile proporcionalno manje. Ovom analizom se može zaključiti da projekat ima dobar ekološki benefit i potpunu ekološku opravdanost za svoju primenu.

5. Zaključak

Svaki kilovat-čas dobijen iz solarne elektrane predstavlja uštedu električne energije, koja se u našem regionu pretežno dobija iz termoelektrana i fosilnih goriva. Time bi se postojeće postrojenje značajno poboljšalo. Prethodnom analizom, može se konstatovati da predloženo rešenje ima tehničku opravdanost i da ostvaruje uštede električne energije. Očekuje se da ovakav koncept proizvodnje vodonika kombinacijom mrežnih pretvarača i pretvarača solarnih elektrana zaživi u budućnosti i postane standardno rešenje. U proizvodnji vodonika, javlja se i kiseonik kao nusproizvod, koji je moguće skladištiti i koristiti u medicinske i druge svrhe ukoliko se postigne odgovarajući kvalitet prilikom samog tehnološkog procesa proizvodnje. Svoju ekspanziju doživljavaju i uređaji energetske elektronike, stoga se otvara značajno polje za napredak u ovoj oblasti, gde naša zemlja ima dobar razvojni potencijal.

Literatura

- [1] State of the art power supplies for electrolyzers - Hydrogen production, ABB, 2022.
- [2] IRENA , Green hydrogen supply - a guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.
- [3] N. Kovacevic, S. Dobričić, "Realizacija dvanaestopulsnog ispravljača bez interfazne prigušnice za napajanje elektrolizera za proizvodnju vodonika", *Cigre Srbija 2025*, <https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B4.12>
- [4] TR 78M 565-585 Watt Mono-facial, jinkosolar.com/uploads/JKM525-545M-72HL4-TV-F1-EN.pdf, pristup: 11.05.2025. Jinkosolar.
- [5] J.Mikulović, Ž. Đurišić, *Solarna energetika*, Beograd, Akademska misao, 2019.
- [6] www.pvsyst.com
- [7] IRENA, Renewable power generation costs in 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2025

Abstract. The paper presents a realized solution for powering an alkaline electrolyser for hydrogen production and offers a proposal for its improvement. By connecting photovoltaic panels, via a DC-DC converter, directly to the DC side of the existing twelve-pulse rectifier, it is possible to achieve savings in electrical energy necessary for hydrogen production through the alkaline electrolysis process. Measurements of electrical quantities for the existing power supply system are provided, along with a simulation of the improved system's operation and a proposal for its more efficient control. Hydrogen obtained using energy from renewable sources in the electrolysis process is green hydrogen, which will be a significant energy carrier in the future and the backbone of the energy transition.

Keywords: hydrogen, alkaline electrolysis, converters, renewable energy sources .

Conceptual Solution for Enhancing the Electrolyser Power Supply System and Hydrogen Production

Nikola Kovačević¹, Kristina Lazović², Milorad Igić¹, Sava Dobričić¹

Rad primljen u uredništvo: 24.12.2025. godine.

Rad prihvaćen: 26.12.2025. godine.