

UDK: 621.314.63:621.357.1
621.314.63:661.96Nikola D. Kovačević¹, Sava M. Dobričić¹

Napajanje alkalnih elektrolizera dvanaestopulsnim ispravljačima bez interfazne prigušnice

¹ Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija*

Stručni rad

Ključne poruke

- Uspešno su realizovani dvanaestopulsni ispravljači bez interfazne prigušnice za potrebe napajanja elektrolizera za proizvodnju vodonika
- U radu je dat način realizacije napajanja elektrolizera, uz prikaz merenih električnih veličina prilikom puštanja novog sistema u rad
- Doprinos rada je izabrana topologija ispravljača koja nije široko poznata
- Realizacija ovakve vrste napajanja za alkalne elektrolizere predstavlja jedinstven iskorak domaće struke u proizvodnji vodonika, za koji se smatra da će biti gorivo budućnosti

Kratak sadržaj

U radu je prikazana realizacija dvanaestopulsnog ispravljača bez interfazne prigušnice, napajanog putem transformatora sa dva sekundara različitih amplituda napona, namenjenog za napajanje elektrolizera za proizvodnju vodonika, izlazne snage 40 kW. Dati su analiza topologije pretvarača, teorijska razmatranja i praktična merenja prilikom puštanja uređaja u rad. Izabrano rešenje je upoređeno sa drugim, trenutno popularnim, rešenjima sa aspekta pouzdanosti, otpornosti na mrežne smetnje i stepena iskorišćenja. Sagledavajući vodonik kao značajan energent budućnosti, predviđa se da će narednih godina njegova proizvodnja postati široko rasprostranjena i u našoj zemlji. Stoga je ovde razmotrena i mogućnost za široku primenu pretvarača i elektrolizera, kao i koncepti primene vodonika u elektroenergetskom sistemu.

Ključne reči

Dvanaestopulsni ispravljač, elektroliza, proizvodnja vodonika, specijalni pretvarači, zelena energija

Primljeno: 11. februar 2026. Recenzirano: 9. jun 2026.
Izmenjeno: 19. jul 2026. Odobreno: 21. jul 2026.

* Nikola Kovačević, +381/64-82-43-858
Imejl: nikola.kovacevic@iecent.org

Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Realizacija dvanaestopulsnog ispravljača bez interfazne prigušnice za napajanje elektrolizera za proizvodnju vodonika” (<https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/cigre37-b4-12/>), nagrađenog u Studijskom komitetu STK-B4 HVDC i energetska elektronika, na 37. Savetovanju CIGRE Srbija, Zlatibor, 26-30. maja 2025.

1. UVOD

Poslednje dve decenije zeleni izvori energije privlače značajnu pažnju, kako stručne tako i šire javnosti. Zelenim izvorima energije obično se smatraju svi izvori energije i goriva koja potiču iz prirodnih izvora (sunčeva svetlost, vetar, voda itd.), a svojom upotrebom ne narušavaju životnu sredinu. Vodonik je u javnosti često smatran zelenim izvorom energije, pre svega zbog činjenice da svojim sagorevanjem sem energije proizvodi samo vodu paru kao nusprodukt. Ipak, 96% trenutne svetske proizvodnje vodonika potiče iz naftne i hemijske industrije. Nešto manje od 1% ukupno proizvedenog vodonika, dobijeno procesom elektrolize vode, zapravo je zeleni vodonik u pravom smislu i to samo ukoliko se električna struja za njene potrebe dobija iz obnovljivog izvora električne energije, [1]. Vodonik se može dobiti na više načina, a neki od njih su: piroliza ugljovodonika, elektroliza vode, parna reformacija prirodnog gasa itd.

Sam proces elektrolize vode predstavlja elektrohemijski postupak kojim se voda razlaže na vodonik i kiseonik, dejstvom električne struje koja kroz nju prolazi. Jedan od tipova elektrolize, koji je od interesa za ovaj rad, jeste alkalna elektroliza. Ona podrazumeva propuštanje jednosmerne struje između anode i katode, koje su uronjene u alkalni rastvor. Tada se molekul vode razdvaja na molekule kiseonika i vodonika, pri čemu se vodonik izdvaja na katodi, a kiseonik na anodi. Uređaji koji sadrže redno naslagane setove anoda i katoda, namenjeni za proizvodnju vodonika procesom alkalne elektrolize, nazivaju se alkalni elektrolizeri, Slika 1. Pored elektrolizera sa alkalnim rastvorom (*AEC*, engl. *Alkaline Electrolyzer*), postoje i elektrolizeri sa jonsko-izmenjivačkom membranom (*AEM*, *Anion Exchange Membrane*), sa proton-izmenjivačkom membranom (*PEM*, *Proton Exchange Membrane*), kao i elektrolizeri sa čvrstim oksidom (*SOEC*, *Solid Oxide Electrolysis Cell*), [2]. Prva tri tipa funkcionišu na nižim temperaturama do 100°C, a elektrolizeri sa čvrstim oksidom rade na temperaturama od tipično 900°C. U ovom radu su analizirani samo alkalni elektrolizeri u kojima se nalazi vodeni rastvor kalijum-hidroksida.



Slika 1. Izgled alkalnog elektrolizera

U savremenoj energetskej tranziciji koja ide ka potpunoj dekarbonizaciji i upotrebi zelenih izvora energije vodonik zauzima značajno mesto. Smatra se da će biti jedan od najznačajnijih energenata budućnosti. Takođe, očekuje se da do 2050. godine elektroliza vode bude način za dobijanje 60% ukupno proizvedenog vodonika, [2]. Mana ovog procesa jeste visoka cena, što predstavlja trenutno glavnu prepreku za njeno intenzivno omasovljenje.

2. ENERGETSKI PRETVARAČI ZA ELEKTROLIZU VODE

U dosadašnjoj praksi postoji više različito primenjenih topologija pretvarača. U upotrebi su i tranzistori i tiristori kao prekidački elementi. U opštem slučaju pretvarači mogu biti realizovani kao jednostepeni (AC-DC) i dvostepeni (AC-DC/DC-DC), [2]. U širokoj upotrebi ovakvi pretvarači rade sa velikim strujama, stoga je upotreba tiristora povoljnija, jer oni mogu biti realizovani za veće struje od tranzistora. Takođe, prednost tiristorske topologije u odnosu na tranzistorsku je i u njenoj robustnosti i većoj pouzdanosti. Od tiristorskih topologija koje se danas koriste u upotrebi su šestopulsni, dvanaestopulsni redni i paralelni pretvarači, kao i dvadesetčetvoropulsni pretvarači. Prema informacijama koje su dostupne autorima, topologija koja je u radu prikazana nije u široj upotrebi. Izborom dvanaestopulsnog ispravljača bez interfazne prigušnice dobija se na robustnosti i pouzdanosti uređaja, što se u konkretnom zadatku očekivalo i time presudno uticalo na izbor topologije pretvarača. U opštem slučaju važi – što je izlazna struja sa manjim riplom, to su gubici u samom elektrolizeru manji, te je odabrana topologija bolja od šestopulsnog pretvarača, dok su od nje bolji visokofrekventni pretvarači. Takođe, visokofrekventni pretvarači poseduju i veći stepen korisnog dejstva i bolji harmonijski spektar mrežne struje. Današnji pretvarači koji se koriste za elektrolizu vode najčešće su snage do nekoliko megavata i mogu biti povezani na mreže niskog ili srednjeg napona, [2].

3. TOPOLOGIJA DVANAESTOPULSNOG ISPRAVLJAČA BEZ INTERFAZNE PRIGUŠNICE

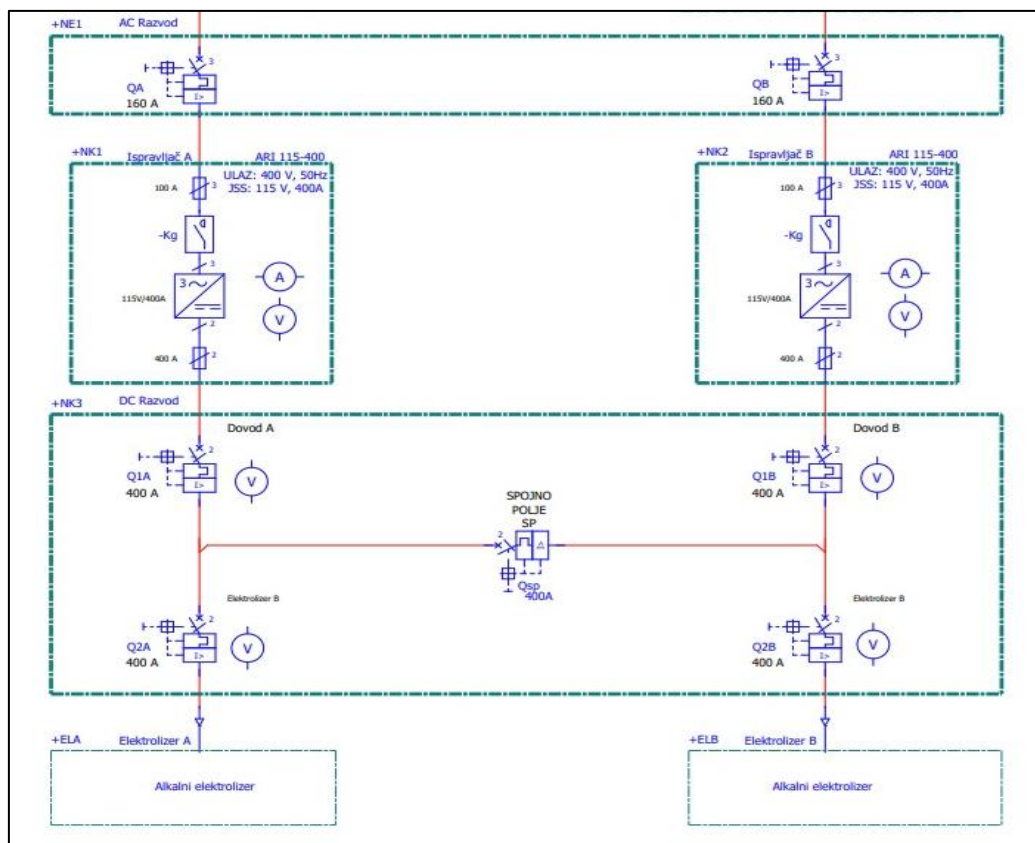
Za potrebe proizvodnje vodonika, namenjenog za hlađenje generatora u termoelektrani, izrađeno je elektropostrojenje za napajanje elektrolizera jednosmernom strujom. Sastoji se od naizmeničnog razvoda, dva identična ispravljača i jednosmernog razvoda, preko koga se napajaju dva alkalna elektrolizera (slike 2 i 3). Svaki od elektrolizera se sastoji od 30 ćelija. Time je izvršena zamena starih motor-generatorskih grupa novim statičkim pretvaračima. Ispravljači su dvanaestopulsni, bez interfazne prigušnice, snage po 40 kW. Maksimalni napon je $U = 115 \text{ Vdc}$, dok je maksimalna struja $I = 400 \text{ Adc}$.



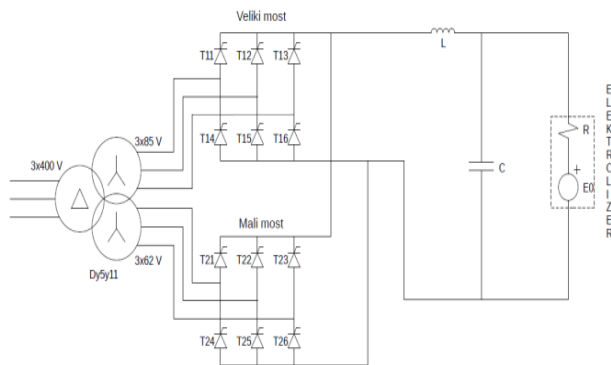
Slika 2. Novo postrojenje za napajanje elektrolizera

Naizmenični razvod (Razvod AC, Slika 3) sastoji se od dva prekidača naizmenične struje koji dovode napon 3×400 V na pripadajući ispravljač. Jednosmerni razvod se sastoji od pet prekidača jednosmerne struje (Razvod DC, Slika 3). Svaki ispravljač i svaki elektrolizer ima svoj prekidač, dok peti prekidač predstavlja spojno polje, koje ostavlja mogućnost ukrštanja ispravljača i elektrolizera. Prekidačima se komanduje ručno, u isključenom stanju ispravljača. U slučaju upotrebe spajnog polja, u radu može biti samo jedan ispravljač i jedan elektrolizer. Za potrebe nesmetanog rada postrojenja, dovoljno je da radi samo jedan par ispravljač-elektrolizer.

Energetski deo ispravljača se sastoji od tronamotajnog transformatora sprege Dy5y11, malog i velikog tiristorskog mosta, i izlaznog LC filtra. Principijelna šema ispravljača prikazana je na Slici 4. Pored toga, pretvarač poseduje i rasklopnu opremu, komandno-signalne elemente, mikroprocesorski regulator sa zaštitama, kao i ekran osetljiv na dodir. Napon primara transformatora je 400 V. Međufazni napon sekundara, sa koga se napaja veliki tiristorski most, iznosi 85 V, dok je međufazni napon tercijara 62 V i sa njega se napaja mali tiristorski most. Dakle, transformator na izlazu ima dve amplitudski nejednake „zvezde”. Takođe, nije implementirana interfazna prigušnica, kao kod većine dvanaestopulsnih topologija. U kolu postoji redna prigušnica, koja sa izlaznim kondenzatorima obrazuje LC filter i smanjuje ripl napona. Odgovarajućom sekvencom paljenja tiristora malog i velikog mosta na izlazu dobija se regulisani talasni oblik napona svojstven dvanaestopulsnim ispravljačima (u diodnom režimu postoji dvanaest jednakih kalota). Odabirom sprege transformatora i njegovih napona sekundara i tercijara, kao i adekvatnim paljenjem tiristora, postiže se da je vektorski zbir dva fazna napona velike zvezde (sekundar transformatora) jednak vektorskom zbiru faznih napona velike i male zvezde (tercijer transformatora). Ovakvom topologijom i sekvencom paljenja tiristora postiže se eliminacija petog i sedmog harmonika struje, sa strane mreže. Takođe izostanak interfazne prigušnice (ili transformatora) predstavlja prednost ovakve topologije.

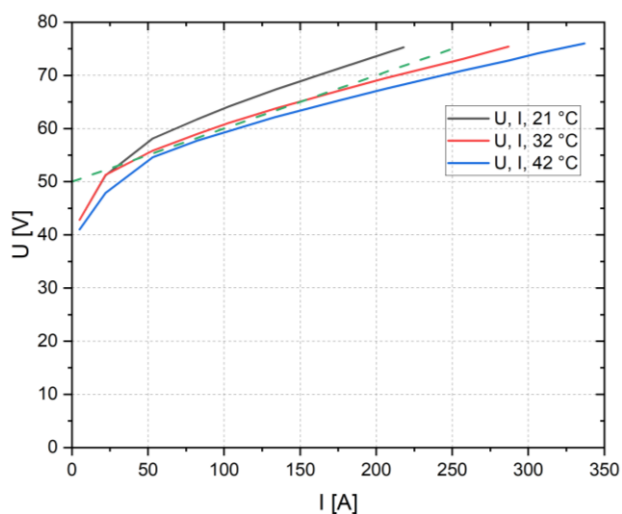


Slika 3. Jednopolna šema postrojenja za napajanje elektrolizera



Slika 4. Topologija ispravljača sa modelom alkalnog elektrolizera

Elektrolizer je modelovan kao redna veza kontraelektromotorne sile (E_0) i rednog otpornika (R). Ta karakteristika, koja liči na diodnu, dobijena je linearizacijom statičke karakteristike elektrolizera, (isprekidana linija na Slici 5) i predstavlja najprostiji model, dovoljno dobar za dimenzionisanje energetske opreme pretvarača. Statička karakteristika je temperaturno zavisna, ali ju je moguće usrednjiti i time dodatno uprostiti model. Sa Slike 5 može se videti da je korišćen model gde je $E_0 = 50$ V, a $R = 0,1 \Omega$. U opštem slučaju, otpornost koja figuriše u modelu je temperaturno zavisna i opada sa porastom temperature i obrnuto.



Slika 5. Statička karakteristika elektrolizera sa linearizovanom karakteristikom modela

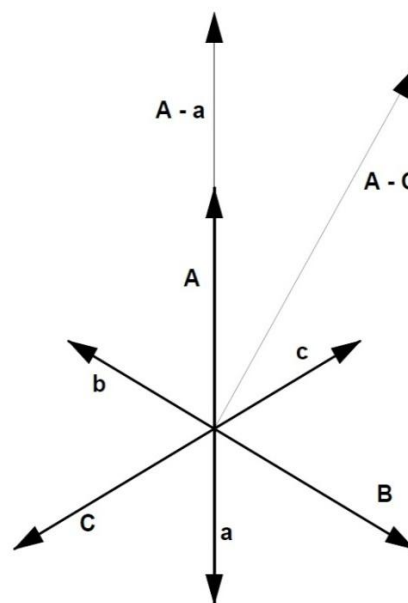
Na Slici 6 prikazan je vektorski dijagram faznih napona na ulazu malog mosta (**a**, **b** i **c**) i na ulazu velikog mosta (**A**, **B** i **C**). Vektori napona će ovde biti označavani boldovanim slovima. Dakle, vrednosti napona sekundara i tercijera transformatora (ulazni naponi velikog i malog mosta, respektivno) tako su odabrane da je moguće adekvatnim paljenjem tiristora u granama malog i velikog mosta dobiti dvanaestopulsni oblik napona na jednosmernoj strani ispravljača. Kada provode tiristori T11 i T21 (Slika 4), tada je napon na jednosmernoj strani ispravljača jednak razlici vektora napona **A-a**, nakon čega

komutuju i struju provode tiristori T11 i T16 i tada je izlazni napon jednak razlici vektora **A-C**. Daljim odgovarajućim paljenjem tiristora malog i velikog mosta obrazuje se sistem od dvanaest identičnih vektora, koji čine izlazni napon ispravljača. Uslov rada ovakve topologije je sledeća jednakost po modulu:

$$|A - a| = |A - C| \quad (1)$$

Jednakost (1) predstavlja suštinu rada ovakvog pretvarača i kroz nju se može uvideti princip rada ove topologije. Takođe, kao i kod drugih dvanaestopulsnih topologija, iz mreže se eliminišu peti i sedmi harmonik struje. Kada se na izlazu formira dvanaestopulsni signal, on se filtrira izlaznim LC filterom i time dodatno ispravlja. Veličina izlaznog filtra zavisi od željenog ripla napona i struje na elektrolizeru. U konkretnom slučaju, odabrana je induktivnost prigušnice $L = 0,1$ mH i kapacitivnost kondenzatora $C = 9400$ μ F, što omogućava da ripl izlazne struje bude ispod zahtevanih 3%.

Na slikama 7 i 8 dat je izgled ispravljača sa prednje i zadnje strane. Na prednjoj strani (Slika 7) uočavaju se ulazni osigurači AC sa kontaktorom, i izlazni osigurači DC, u dnu slike. U gornjem delu slike nalazi se upravljačka elektronika, a iznad nje je mali tiristorski most.



Slika 6. Vektorski dijagram napona ispravljača

Na Slici 8 sa zadnje strane uređaja postavljen je transformator na dnu, na srednjoj „polici” su izlazna prigušnica i kondenzatori (LC filter), dok je u gornjem delu veliki tiristorski most. Implementirane su i zaštite od brzih komutacionih prenapona u vidu RC kola (*Snubber*) na oba tiristorska mosta (malom i velikom). Kao zaštita tiristora od kratkih spojeva postavljeni su i ultrabrz osigurači na naizmeničnoj (ulaznoj) strani malog i velikog mosta.



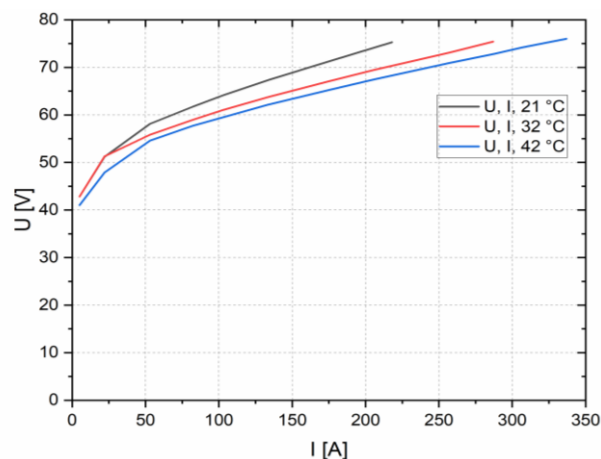
Slika 7. Izgled ispravljača – prednja strana



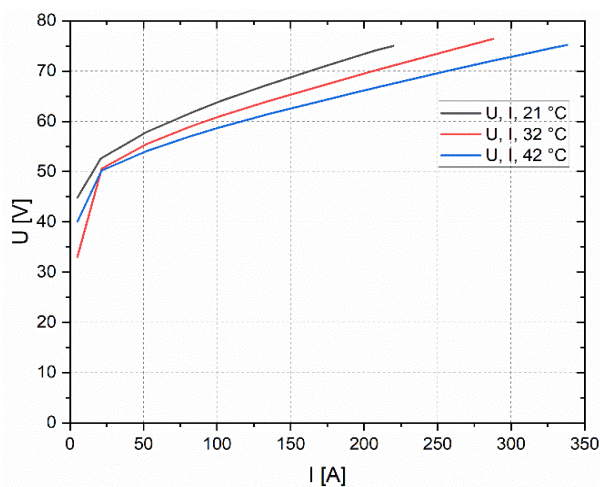
Slika 8. Izgled ispravljača – zadnja strana

4. MERENJA ULAZNO-IZLAZNIH VELIČINA I ANALIZA RADA ISPRAVLJAČA

Prilikom puštanja uređaja u rad izvršena su merenja ulazne fazne struje, ulaznog faznog napona, izlazne jednosmerne struje i izlaznog jednosmernog napona. Merenja su vršena merno-akvizicionim sistemom sa frekvencijom odabiranja od 5 kHz. Oba elektrolizera su pokrenuta iz hladnog stanja, a merenja su vršena sve vreme, do postizanja optimalne radne tačke, za koju se ima struja od približno 320 A i napon nešto manji od 75 V. Tada čistoća vodonika na izlazu iznosi 99,5%. Prvo su snimljene statičke karakteristike oba elektrolizera, pri različitim temperaturama (slike 9 i 10). Ove statičke karakteristike potvrđuju da se najprostiji model elektrolizera može napraviti kao redna veza elektromotorne sile i otpornosti koja predstavlja strminu karakteristike.



Slika 9. Statička karakteristika elektrolizera 1



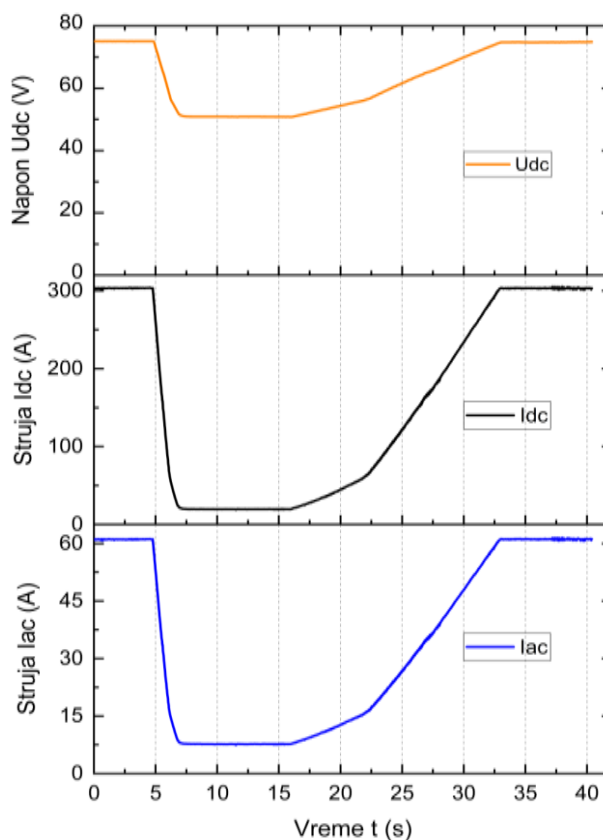
Slika 10. Statička karakteristika elektrolizera 2

Konstruisana je namenska mikrokontrolerska ploča koja generiše upaljačke impulse za tiristorski most, koja reguliše izlazne parametre i ima HMI funkciju. Regulacija izlazne veličine se vrši primenom PID regulatora. Uzimajući u obzir specifičnosti rada postrojenja za elektrolizu, formiran je i program regulacije izlaznih veličina. S obzirom na to da zbog tehnološke izvedbe ne postoji predgrevanje elektrolizera već je, naprotiv, od starta prisutno hlađenje rashladnom vodom, kao i činjenice da se u startu postrojenja (sve dok se ne postignu radni parametri) proizvedeni vodonik ne skladišti (veći udeo nečistoća), program regulacije je definisan kroz U-I režime. Dok je elektrolizer hladan, pri nominalnim naponskim karakteristikama struja je relativno mala, i u tom delu se vrši naponska regulacija (tzv. U-režim), tako da se ne pređe maksimalno dozvoljeni napon (75 V u slučaju konkretnih elektrolizera, što je preporuka proizvođača), a da se istovremeno ostvari najveća moguća struja (najbrže moguće zagrevanje elektrolizera, tj. najkraći ulazak u radni režim). U tom delu nelinearnost UI karakteristike nije od značaja, u smislu regulacije, jer dinamika samog regulatora sa dinamikom ispravljača daleko nadmašuje dinamiku samog procesa elektrolize. S vremenom se elektrolizer zagreva i struja prirodno raste, iako je aktivan naponski režim regulacije. Kada se postignu uslovi, regulator prelazi u mod regulacije struje (I-režim), dok U-regulacija ostaje aktivna kao sigurnosna mera, u slučaju proboja neke ćelije elektrolizera, poremećaja u gustini elektrolita i sl. Sa statičkih karakteristika (slike 9 i 10) vidi se da je u širokom opsegu većih struja U-I karakteristika praktično linearna, što znači da u pogledu regulacije dominira rezistivan karakter elektrolizera. Nagib karakteristike određen je radnom temperaturom elektrolizera. Dinamika njene promene je izuzetno spora u poređenju sa dinamikom pretvarača jer zavisi od više parametara (temperatura ambijenta, protok i temperatura dolazne vode itd.). Na Slici 11 prikazane su srednja vrednost napona (U_{dc}) i struje (I_{dc}) jednog elektrolizera i efektivna vrednost mrežne struje (I_{ac}) pri promeni izlazne struje elektrolizera sa 300 A na 20 A i nazad na 300 A, pri temperaturi elektrolizera od 42°C.

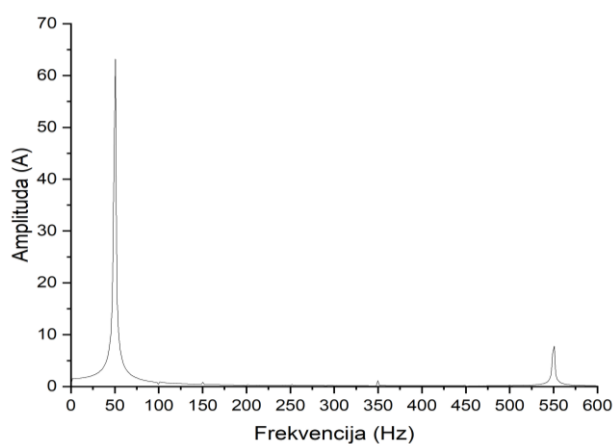
Napon napajanja ispravljača je bio konstantan (3×400 Vac), i nije grafički prikazan. Sa Slike 11 može se uočiti i rezistivni karakter opterećenja elektrolizera. Spektralnom analizom struje mreže koja se ima pri struji elektrolizera od 300 A, može se videti da su peti i sedmi harmonik zaista potisnuti (Slika 12). Ostvareni ripl struje pri 300 A na elektrolizeru je oko 2%, dok je ripl napona 0,2%. Stepenn korisnog dejstva ispravljača je preko 86% (računato pri izlaznom naponu od 75 V i struji od 320 A, što predstavlja i najčešće radno stanje elektrolizera i ispravljača).

5. PRAVCI RAZVOJA PROIZVODNJE VODONIKA ELEKTROLIZOM VODE

Trenutni pravci razvoja proizvodnje vodonika putem elektrolize su raznoliki. Jedan od glavnih ciljeva jeste pojeftinjenje procesa proizvodnje, tj. svođenje cene ovako dobijenog vodonika na nivoe dizel-goriva. Dominantni koraci u tom pravcu jesu uvođenje novih tipova elektrolizera (PEM i SOEC, pored klasičnih alkalnih) i podizanje efikasnosti pretvarača za njihovo napajanje jednosmernom strujom.



Slika 11. Napon i struje ispravljača pri promeni izlazne struje u opsegu 300A-20A-300A



Slika 12. Spektar struje sa strane mreže pri struji elektrolizera od 300 A

5.1. Razvoj elektrolizera

Paralelno sa razvojem energetske pretvarača, teče i razvoj samih elektrolizera. Dominantan je i dalje alkalni tip, s obzirom na to da je to tehnologija usavršavana i poznata dugi niz godina. U poslednje vreme, PEM elektrolizeri dobijaju na značaju u praksi, dok istraživački radovi idu u pravcu razvoja elektrolizera sa čvrstim oksidom (SOEC). Trenutni stepen razvoja omogućava efikasnost konverzije od 60% do 80% kod alkalnih, 70-80% kod PEM, [4] i > 90% kod SOEC elektrolizera (eksperimentalna istraživanja, realna implementacija se tek očekuje), [5].

Naravno, ne treba zaboraviti da na efikasnost konverzije električne struje u vodonik utiče i efikasnost ostalih pomoćnih sistema, kao što su sistemi za njegovo prečišćavanje i kompresiju.

Kako postoji mnogo efekata koji utiču na efikasnost elektrolize, postoji i mnogo pravaca u kojima su moguća poboljšanja. Trenutno govorimo o ukupnoj efikasnosti procesa reda od 60% do 80%, sa ciljem da u bliskoj budućnosti ona bude i preko 80%. Na tom nivou efikasnosti procesa već je moguće postići cenu vodonika u rangu fosilnih goriva, što će značajno ubrzati razvoj tehnologija proizvodnje i skladištenja.

5.2 Razvoj napajanja

Neizostavni deo svakog sistema za elektrolizu jeste i energetski pretvarač za napajanje. Ti pretvarači su u suštini izvori jednosmernog napona i jednosmerne struje, pri čemu je napon definisan odabirom broja ćelija elektrolizera, a struja konstrukcijom i tipom same ćelije elektrolizera, tj. željenom gustom jednosmerne struje. Danas su na industrijskom nivou dominantni tiristorski pretvarači, najčešće u 12-pulsnim i 24-pulsnim konfiguracijama. Ove konfiguracije su se pokazale kao robusno rešenje, a istovremeno i skalabilno u širokom opsegu snaga, počev od reda nekoliko kW pa sve do više MW. Ipak, tiristorski pretvarači imaju određene probleme, pre svega u postojanju naizmjenične komponente u jednosmernoj struji, relativno niskom THD-u i povećanom sadržaju niskih harmonika. Ovi problemi se najčešće rešavaju implementiranjem aktivnih i pasivnih filtera koji, sa druge strane, ne samo što podižu cenu nego i smanjuju efikasnost konverzije. Na nivoima nižih i srednjih snaga, visokofrekventni AC/DC pretvarači već sada pokazuju bolje karakteristike u pogledu stepena korisnog dejstva i odsustva harmonika u generisanju jednosmerne struje, dok cenovno ne odstupaju previše od tiristorskih rešenja. Za visoke snage primenjuje se koncept modularnih pretvarača, gde se umesto jednog primenjuje paralelna veza više modula, i time se, sem potrebne snage, postiže i određena redundansa u radu. Ovaj koncept, za sada, ne može da po

ceni konkuriše rešenjima sa tiristorskim pretvaračima, ali se veliki deo istraživanja usmerava u tom pravcu.

Realizovano i u ovom radu opisano napajanje elektrolizera, može se unaprediti, povezivanjem solarne elektrane i DC-DC pretvarača, koji bi sunčevu energiju koristili za smanjenje električne energije koja se uzima iz mreže preko postojećih ispravljača, [6]. Time bi se podigla efikasnost samog postrojenja, smanjilo zagađenje životne sredine i smanjili troškovi proizvodnje vodonika.

5.3. Vodonik u elektroenergetskom sistemu budućnosti

Izuzev upotrebe u vidu alternativnog goriva, sve više na značaju dobija ideja upotrebe vodonika kao medijuma za skladištenje energije. Trenutno, upotreba obnovljivih izvora, poput solara i vetra, u generisanju električne energije doživljava vrhunac, ponegde i nadmašujući nivo proizvodnje iz klasičnih izvora, kao što su fosilna goriva i hidropostrojenja. I pored brojnih prednosti, tako veliko učešće solarnih i vetrogeneratora izazvalo je niz novih problema u elektroenergetskim sistemima. Zavisnost proizvodnih mogućnosti od faktora koji nisu pod kontrolom čoveka dovodi do toga da upravljanje elektroenergetskim sistemom postaje sve komplikovanije. Problemi robustnosti i stabilnosti, koji su ranije imali jedan način rešavanja, sada dobijaju sasvim novu dimenziju, do te mere da mogući scenariji predviđaju potpune raspade sistema kao posledice intermitentne proizvodnje koja je osnovna karakteristika solarnih i vetroelektrana.

Kao stubovi odbrane od nestabilnosti sistema, u cilju balansiranja mreže, pored klasičnih turbogeneratora, i postrojenja za skladištenje energije imaju odlučujuću ulogu. Danas primenjivana rešenja jesu reverzibilne elektrane, baterijska postrojenja i mehanički akumulatori (zamajci), [7].

Reverzibilne hidroelektrane zahvaljujući svom kapacitetu predstavljaju primarni oblik akumuliranja energije. Sa tačke upravljanja, lako se integrišu u nadređeni sistem regulacije frekvencije i napona mreže, ali najveća im je mana (pored cene izgradnje) ta da zahtevaju specifične geološke i hidrološke uslove, te su podložne klimatskim promenama (nedostatku vode).

Baterijska postrojenja su dobila dosta na značaju padom cena i razvojem tehnologija baterija koje služe kao medijum za akumuliranje energije. Velikom brzinom reagovanja sposobne su da doprinesu regulaciji frekvencije, ali ih mala gustina energije po jedinici zapremine čini neefikasnim u pogledu komplikovane izvedbe kod aplikacija većih snaga. Napredak tehnologije u izradi baterija trebalo bi da prevaziđe oba problema, npr. relativno brzo se očekuje da će se sa sadašnjih 250 Wh/kg,

[8], gustina energije baterija podići na nivo od 500 Wh/kg, [9].

Elektromehanički akumulatori u obliku zamajca su sposobni da brzo predaju aktivnu snagu mreži, ali su ograničeni kako po nivou te snage tako i po količini uskladištene energije. Za njihovu efikasnu primenu potrebno je izgraditi veliki broj ovakvih jedinica, što uglavnom dovodi do toga da se tehnološka opravdanost gubi pred ekonomskom.

Kao alternativa svim ovim tehnologijama i tehničkim rešenjima, već duže vreme postoji ideja da se vodonik iskoristi kao medijum za skladištenje energije. Višak proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora, kao što su solarne i vetroelektrane, koristio bi se za napajanje elektrolizera, proizvodnju i skladištenje vodonika, u svrhu njegove naknadne upotrebe (u trenucima kada je to neophodno) za generisanje električne energije, putem gorivih ćelija ili gasnih turbina, [10]. Ovakva rešenja su skalabilna, tako da multiplikovanjem postrojenja praktično ne postoje ograničenja u akumuliranoj energiji i snazi. Iako ideja deluje jednostavno, postoji niz otežavajućih okolnosti koje sprečavaju jednostavnu i ekonomski opravdanu primenu. Recimo, proces elektrolize za postizanje optimalne radne tačke (u smislu gubitaka) zahteva određene uslove, koji su često u suprotnosti sa načinom na koji solarna i vetropostrojenja generišu električnu energiju. I solarna i vetropostrojenja predstavljaju izuzetno nepostojane izvore električne energije, u kojima proizvodnja u vremenu varira između 0% i 100% nominalnog kapaciteta. Direktnim sprezanjem bi srednja vrednost jednosmerne struje varirala u navedenom opsegu. I kod alkalnih i kod PEM elektrolizera postoji prirodni efekat koji u slučaju da gustina struje kroz membrane nije u optimalnim opsezima čini da se mehurići generisanog vodonika lepe za membrane elektrolizera i time povećavaju omsku otpornost (i toplotne gubitke), smanjuju efektivnu površinu membrane ćelije, odnosno gustinu struje. Ovo poslednje varira kako sa izborom materijala za membrane ćelija elektrolizera tako i sa tipom elektrolita koji se koristi, kao i sa radnim pritiskom, ali pre svega sa gustinom struje, gde se pri njenim optimalnim gustinama prirodnim efektom vrenja ubrzava odvajanje mehurića vodonika od površine ćelijske membrane, [11]. Ovaj efekat između ostalog čini da postoje optimalni režimi rada, tačnije optimalne gustine struje u kojima elektrolizeri treba da rade da bi ostvarili maksimalnu efikasnost procesa. Različiti tipovi elektrolizera su u različitoj meri podložni uticaju ove pojave na gubitke. Recimo, kod većine proizvođača, za alkalne elektrolizere opseg rada varira između 40% i 100% nominalne struje, mada neki proizvođači tvrde da se ta granica može spustiti i na 20%. Prema [12], tipovi PEM sposobni su da rade u nešto širim opsezima gustina struja, pojedini proizvođači navode podatak o čak 0% do 100%, što ih čini dobrim izborom u

kombinaciji sa napajanjem iz solarnih ili vetroelektrana, [13].

Konverzija „električna energija – vodonik – električna energija” ima ukupnu efikasnost od oko 40%, što je niže nego kod upotrebe klasičnih baterijskih skladišta, ali se isplati kod velikih postrojenja, zbog dužeg životnog veka u odnosu na baterijska skladišta, [10].

6. ZAKLJUČAK

Uspešno je realizovano postrojenje za napajanje dva elektrolizera sa dva dvanaestopulsna ispravljača bez interfazne prigušnice. Specifičnost topologije ovih pretvarača, gde se komutacije tiristora obavljaju kako unutar jednog mosta tako i između tiristora malog i velikog mosta, predstavlja kvalitet topologije koja do sada nije bila široko dostupna. Većina dvanaestopulsnih ispravljača predstavlja ili rednu ili paralelnu vezu tiristorskih mostova i uglavnom sadrži interfaznu prigušnicu ili transformator. Iskustva stečena u radu sa elektrolizerima predstavljaju dodatni kvalitet, imajući u vidu da u Srbiji gotovo da ne postoje elektrolizne stanice ili su one malih snaga, pretežno laboratorijskog tipa. Vodonik koji je dostupan na našem tržištu je većinski uvezen iz inostranstva ili je dobijen u hemijskoj industriji kao nusprodukt. Može se slobodno konstatovati da u Srbiji postoji značajan prostor za bavljenje elektrolizom sa aspekta pretvaračkih jedinica, koji će se zasigurno u budućnosti sve više povećavati. Kao gorivo budućnosti, vodonik predstavlja šansu za energetske tranziciju. U našoj zemlji ne postoji dovoljan broj stručnjaka iz te oblasti kako bi ispratili svetske trendove rasta potreba za vodonikom. Primena pretvarača u ove svrhe tek treba da doživi svoju ekspanziju i omogućiti dodatni razvoj energetske elektronike u Srbiji.

LITERATURA

- [1] Hydrogen production, https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_production
- [2] State of the Art Power Supplies for Electrolyzers - Hydrogen Production, ABB, 2022.
- [3] ABB DC power supplies DCS880, 20 A to 5200 A/19600 A, ABB, 2022.
- [4] Gallandat, N., Romanowicz, K., Züttel, A., An Analytical Model for the Electrolyser Performance Derived from Materials Parameters, *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol. 5 No. 10, October 2017.
- [5] Nguyen, M., Electrolysis Operating Mode for Reversible Solid Oxide Fuel Cells, *ECS Transactions*, 2015, Vol. 68 (1), p.p. 3301-3305.
- [6] Kovačević, N., Lazović, K., Igić, M., Dobričić, S., Idejno rešenje za unapređenje sistema za napajanje elektrolizera i proizvodnju vodonika, *Zbornik radova Elektrotehnički institut Nikola Tesla*, knjiga 35, 2025.

- [7] Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., et al, „Progress in Electrical Energy Storage System: A Critical Review”, *Progress in Natural Science*, 2009, vol. 19, no. 3, pp. 291–312.
- [8] Kim, K. J., Balaish, M., Wadaguchi, M., et al, Solid-State Li–Metal Batteries: Challenges and Horizons of Oxide and Sulfide Solid Electrolytes and Their Interfaces, *Advanced Energy Materials*, 2020, 11(1).
- [9] Fan, F. Y., Pan, M. S., Lau, K. C., et al. Solvent Effects on Polysulfide Redox Kinetics and Ionic Conductivity in Lithium-Sulfur Batteries, *Journal of the Electrochemical Society*, 2016
- [10] IRENA (2020), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- [11] Sangtam, B. T., Park, H., Review on Bubble Dynamics in Proton Exchange Membrane Water Electrolysis: Towards Optimal Green Hydrogen Yield, *Micromachines*, 2023, 14(12)
- [12] Xia, Y., Cheng, H., He, H., Wei, W., Efficiency and Consistency Enhancement for Alkaline Electrolyzers Driven by Renewable Energy Sources, *Communications Engineering*, 2023, <https://doi.org/10.1038/s44172-023-00070-7>, ISSN 2731-3395 (online)
- [13] Kim, C. K., Cho, H., Kim, C., et al, A Feasibility Study of Photovoltaic—Electrolysis—PEM Hybrid System Integrated into the Electric Grid System Over the Korean Peninsula, *Frontiers in Chemistry*, Vol. 9, Art. No. 732582, September 2021, doi: 10.3389/fchem.2021.732582

BIOGRAFIJE



Nikola Kovačević je rođen 1994. godine u Beogradu. Završio je osnovne i master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na smeru za Energetiku. Nakon završenih studija, započinje profesionalnu karijeru i od 2019. godine je zaposlen u Elektrotehničkom institutu „Nikola

Tesla” u Beogradu, u Centru za automatiku i regulaciju. Trenutno je na poziciji stručnog saradnika. Tokom rada, učestvovao je u projektovanju, izradi i puštanju u rad specijalnih namenskih uređaja energetske elektronike, pobudnih sistema velikih sinhronih motora, ispravljača, sistema srednjenaponske preklapne automatike i uređaja za sinhronizaciju sinhronih generatora. Od 2019. godine je student doktorskih akademskih studija na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Autor je više stručnih i naučnih radova iz oblasti energetske elektronike. Član je CIGRE Srbija, STK B4.

ORCID: 0009-0004-9864-5305



Sava Dobričić je rođen 1970. godine u Aranđelovcu. Završio je Elektrotehnički fakultet 1996, stekavši zvanje diplomiranog inženjera elektrotehnike. Od 1998. godine zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”, gde i danas radi u zvanju stručnog savetnika. Polja njegovog delovanja su *embedded* sistemi

upravljanja, energetske pretvarači srednjih i velikih snaga, sistemi upravljani PLC-ovima i SCADA sistemima za kontrolu i monitoring, razvoj pretvarača za napajanje elektrolizera za proizvodnju vodonika i kiseonika kao i problemi regulacije tokova reaktivnih snaga i naponskih prilika u elektroenergetskim sistemima. Vodi projekte razvoja uređaja energetske elektronike. Autor je i koautor više radova iz ovih oblasti.

ORCID: 0009-0003-7115-9887

UDC: 621.314.63:621.357.1
621.314.63:661.96Nikola D. Kovačević¹, Sava M. Dobričić¹

Powering Alkaline Electrolyzers with Twelve-Pulse Rectifiers without an Interphase Transformer

¹ Nikola Tesla Institute, Belgrade, Serbia*

Professional article

Highlights

- Twelve-pulse rectifiers without an interphase transformer have been successfully implemented for electrolyzer power supply and hydrogen
- The paper details the implementation method for the electrolyzer power supply, providing a display of measured electrical quantities during the commissioning of the new system
- The selected rectifier topology described in this work is not widely known, which represents an additional contribution and value to the paper
- The realization of this type of power supply for alkaline electrolyzers represents a unique step forward for the domestic industry in hydrogen production, which is considered the fuel of the future

Abstract

The paper presents the realization of a twelve-pulse rectifier without an interphase transformer, supplied via a transformer with two secondaries of different voltage amplitudes, intended for powering a hydrogen production electrolyzer with an output power of 40 kW. An analysis of the converter topology, theoretical considerations, and practical measurements during the commissioning of the device are provided. The chosen solution is compared with other currently popular solutions from the aspects of reliability, immunity to grid disturbances, and efficiency. Viewing hydrogen as a significant energy source of the future, its production is predicted to become widespread in our country in the coming years. Therefore, the possibility for a wide application of converters and electrolyzers is discussed here, as well as the concepts of hydrogen application in the electrical power system.

Keywords

Electrolysis, Green energy, Hydrogen production, Special converters, Twelve-pulse rectifierReceived: February 11th, 2026Reviewed: June 9th, 2026Modified: July 19th, 2026Accepted: July 21st, 2026

* Nikola Kovacevic, +381/64-82-43-858

E - mail: nikola.kovacevic@ieent.org

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Implementation of a Twelve-Pulse Rectifier Without an Interphase Transformer for Supplying Hydrogen Generating Electrolyzer" (<https://doi.org/10.2478/cigre37-b4-12/>), awarded in the Expert Committee EC-B4 HVDC and Power Electronics, at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, 26-30 May 2025.

