

DOI: [10.46793/CIGRE37.B4.12](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B4.12)**B4.12****REALIZACIJA DVANAESTOPULSNOG ISPRAVLJAČA BEZ INTERFAZNE
PRIGUŠNICE ZA NAPAЈANJE ELEKTROLIZERA ZA PROIZVODNJU VODONIKA****Nikola Kovačević*, Sava Dobričić****ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT NIKOLA TESLA, BEOGRAD, SRBIJA**

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 40kW. Data je 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. Analizirane su i fizičko-hemijske karakteristike alkalnih elektrolitičkih ćelija za dobijanje vodonika. Kao značajan energent budućnosti, predviđa se da će proizvodnja vodonika postati široko rasprostranjena u našoj zemlji narednih godina, stoga je razmotrena i mogućnost za široku primenu pretvarača namenjenih elektrolizi kao i načini njihove realizacije.

Ključne reči- Dvanaestopulsni ispravljač - Elektroliza- Vodonik - Kvalitet električne energije - Specijalni pretvarači - Zelena energija

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...), 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 vodenu 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, je zapravo "zeleni vodonik" u pravom smislu i to samo ukoliko se 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

* Koste Glavinića 8a, Beograd, nikola.kovacevic@ieent.org

elektrolize, koji je od interesa za ovaj rad, jeste alkalna elektroliza. Podrazumeva propuštanje jednosmerne struje između anode i katode, koje su uronjene u alkalni rastvor. Tada se molekuli 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) postoje i elektrolizeri sa jonsko-izmenjivačkom membranom (AEM), sa proton-izmenjivačkom membranom (PEM) kao i elektrolizeri sa čvrstim oksidom (SOEC) [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.

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 elektroliza vode, bude način za dobijanje 60% ukupno proizvedenog vodonika, do 2050. godine [2]. Mana ovog procesa jeste visoka cena, što predstavlja trenutno glavnu prepreku za njeno intenzivno omasovljenje.

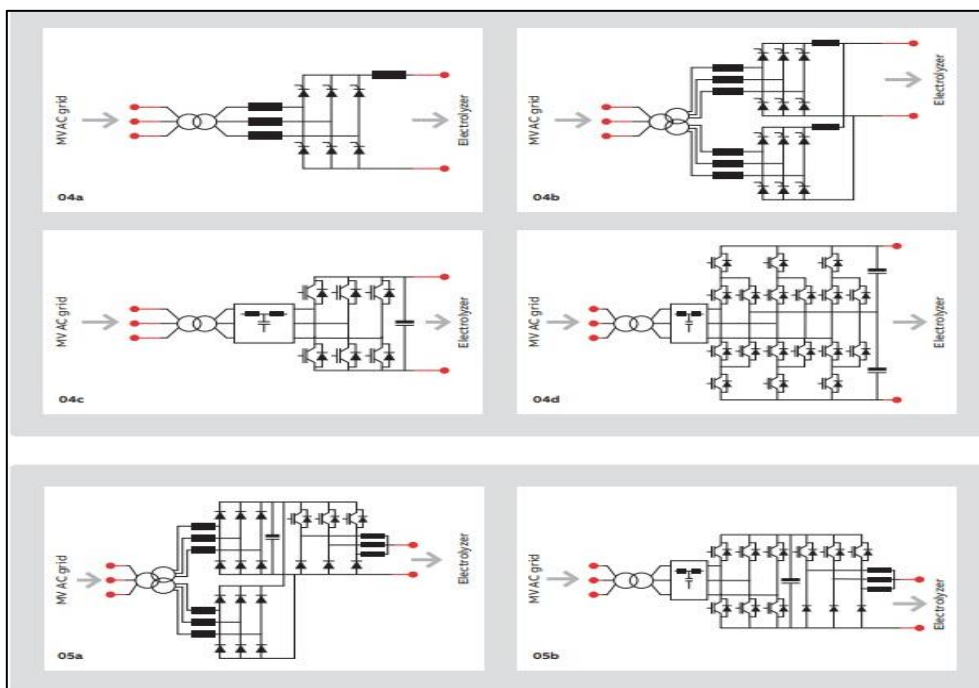


Slika 1. Izgled alkalnog elektrolizera.

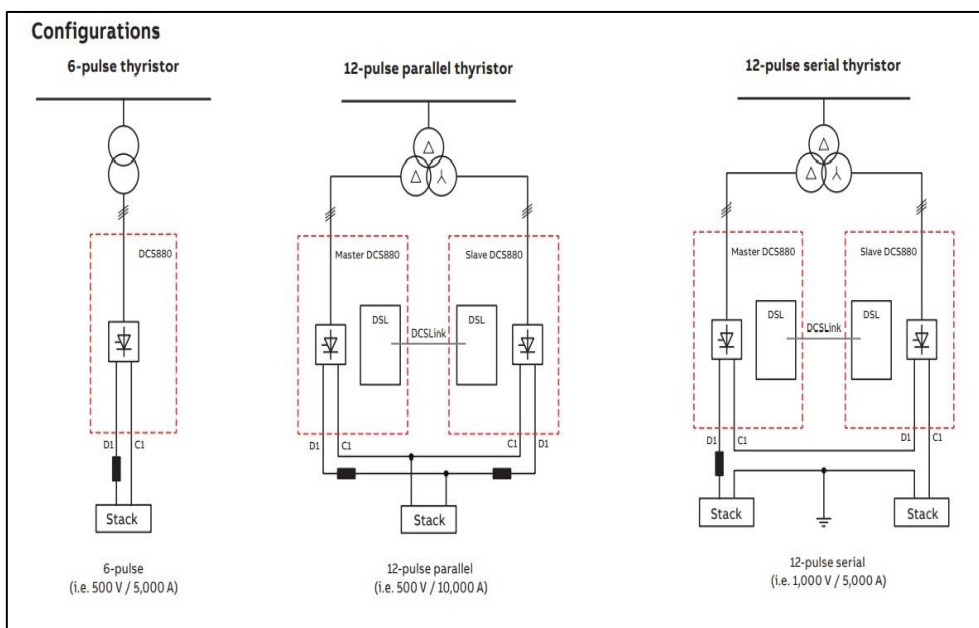
2 ENERGETSKI PRETVARAČI ZA ELEKTROLIZU VODE

U dosadašnjoj praksi, postoji više različito primenjenih topologija pretvarača, a neke od njih su prikazane na slici 2, [2]. 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). 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 robusnosti i većoj pouzdanosti. Na slici 3, prikazane su neke od tiristorskih topologija koje se danas koriste [3]. 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 robusnosti i pouzdanosti uređaja, što se u konkretnom

zadatku očekivalo i time presudno uticalo na izbor topologije pretvarača. U opštem slučaju, važi da, 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 od nekoliko megavata i mogu biti povezani na niski ili srednji napon mreže [2].



Slika 2. Topologije pretvarača za elektrolizu vode.



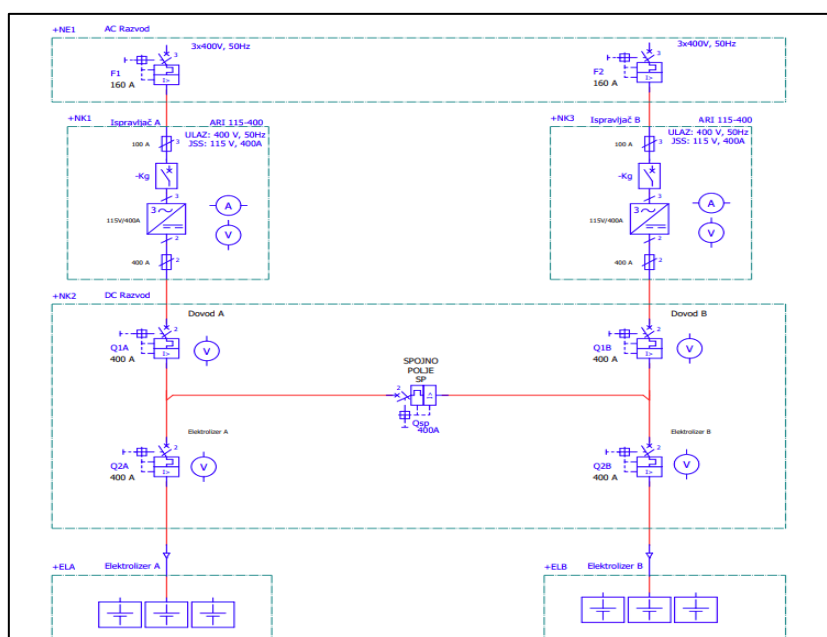
Slika 3. Tiristorske topologije pretvarača za elektrolizu vode.

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 naizmjeničnog razvoda, dva identična ispravljača i jednosmernog razvoda, preko koga se napajaju dva alkalna elektrolizera (slike 4 i 5) . 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 svaki od njih. Maksimalni napon je $U=115\text{ Vdc}$ dok je maksimalna struja $I=400\text{ A}$.



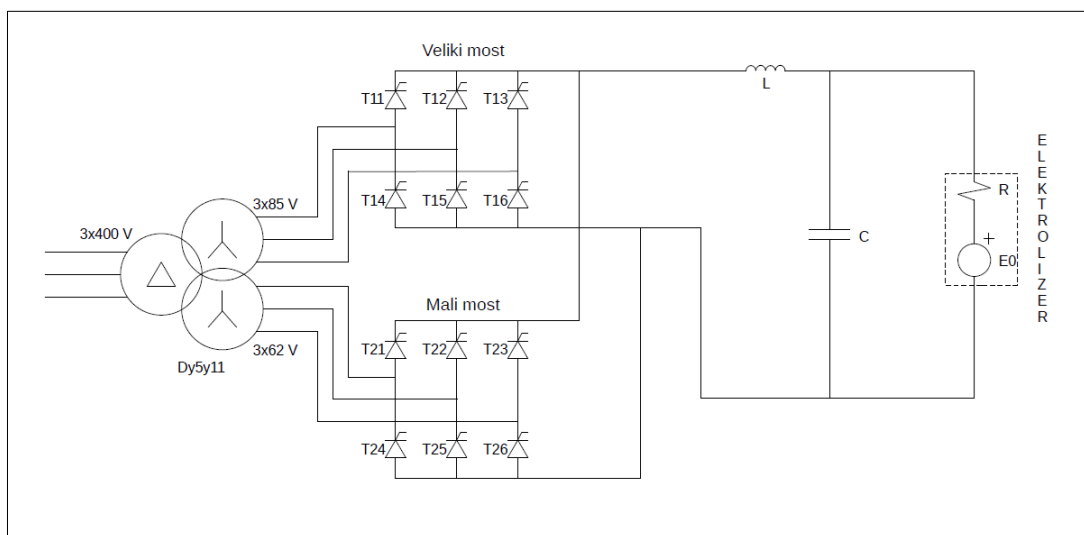
Slika 4. Novo postrojenje za napajanje elektrolizera.



Slika 5. Jednopolna šema postrojenja za napajanje elektrolizera.

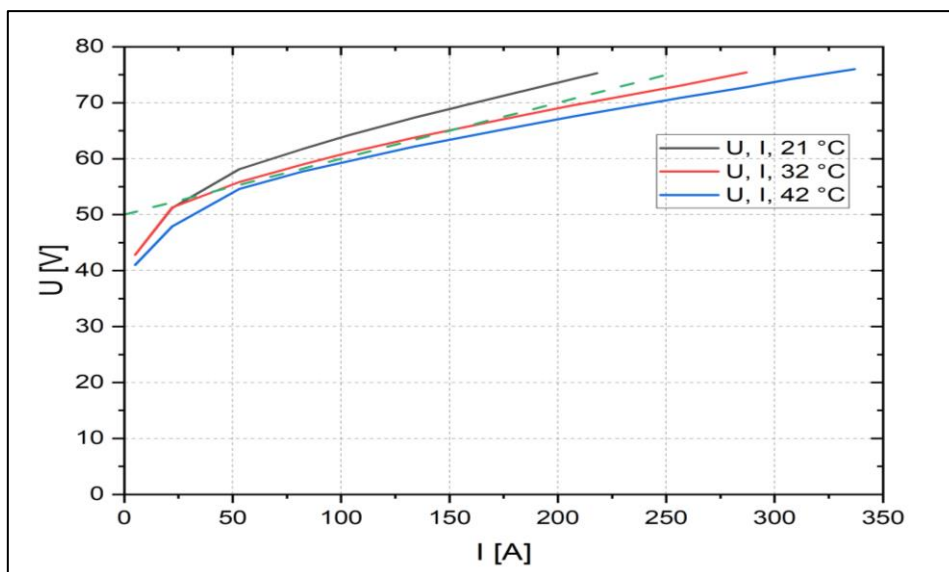
Naizmenični razvod (AC Razvod, slika 5) se sastoji od dva prekidača naizmenične struje koji dovode napon 3×400 V na pripadajući ispravljač. Jednosmerni razvod se sastoji od pet prekidača jednosmerne struje (DC Razvod, slika 5). Svaki ispravljač i svaki elektrolizer ima svoj prekidač, dok peti prekidač predstavlja spojno polje, koje ostavlja mogućnost ukrštanja ispravljača i elektrolizera. U slučaju upotrebe spojnog 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 tronamotnog transformatora sprege Dy5y11, malog i velikog tiristorskog mosta, i izlaznog LC filtra. Principijelna šema ispravljača prikazana je na slici 6. Pored toga, pretvarač poseduje i rasklopnu opremu, komandno-signalne elemente, mikroprocesorski regulator sa zaštitama, kao i ekran osjetljiv na dodir. Napon primara transformatora je 400 V. Međufazni napon sekundara, sa koga se napaja veliki tiristorski most, je 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 se dobija regulisani talasni oblik napona svojstven dvanaestopulsnim ispravljačima (u diodnom režimu se ima 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 tranformatora) predstavlja prednost ovakve topologije.



Slika 6. Topologija pretvarača sa modelom alkalnog elektrolizera.

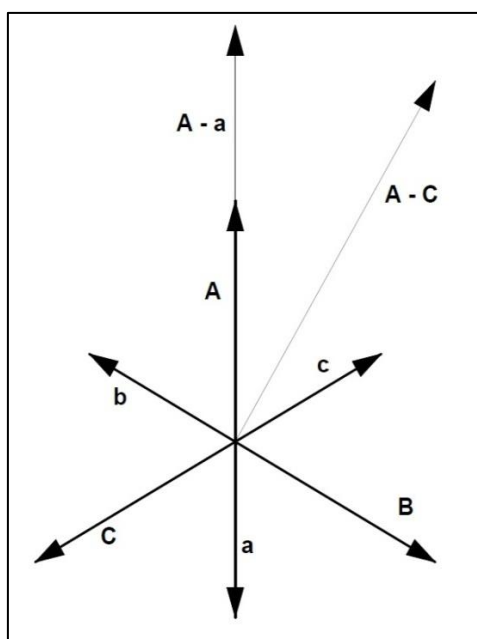
Elektrolitzer je modelovan kao redna veza kontraelektromotorne sile (E_0) i rednog otpornika (R). Ta karakteristika, koja liči na diodnu, dobijena je linearizacijom statičke karakteristike elektrolizera, (isprekidana linija na slici 7) i predstavlja najprostiji model, dovoljno dobar za dimenzionisanje energetske opreme pretvarača. Statička karakteristika je temperaturno zavisna, ali je moguće istu usrednjiti i time dodatno uprostiti model. Sa slike 7 se može 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 7. Statička karakteristika elektrolizera sa linearizovanom karakteristikom modela.

Na slici 8 je prikazan vektorski dijagram faznih napona na ulazu malog mosta (**a**, **b** i **c**), i na ulazu velikog mosta (**A**, **B** i **C**). Vektori će biti označavani boldovanim slovima. Dakle, vrednosti napona sekundara i tercijera transformatora (ulazni naponi velikog i malog mosta, respektivno) su tako 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, 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:

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



Slika 8. Vektorski dijagram napona ispravljača.

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 dvanaestopulsní signal, isti se filtrira izlaznim LC filtrom 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 9 i 10 dat je izgled ispravljača sa prednje i zadnje stranje. Na prednjoj strani (slika 9) se uočavaju ulazni AC osigurači sa kontaktorom, i izlazni DC osigurači, u dnu slike. U gornjem delu slike se nalazi upravljačka elektronika, a iznad nje je mali tiristorski most. Na slici 10, sa zadnje strane uređaja je postavljen transformator na dnu, na srednjoj "polici" su izlazna prigušnica i kondenzatori (LC filter), dok je u gornjem delu veliki tiristorski most.



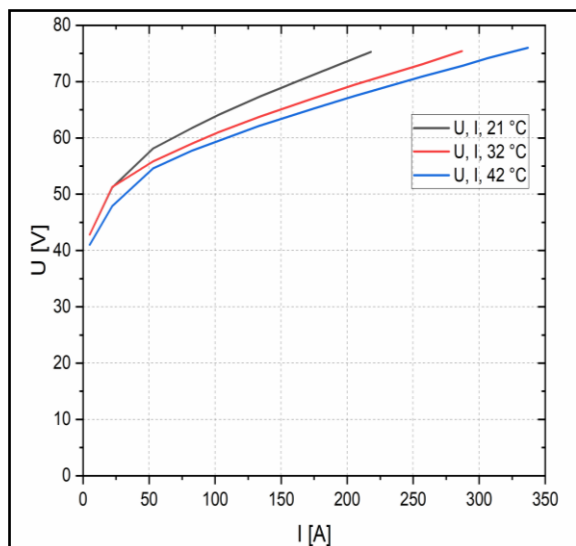
Slika 9. Izgled ispravljača - prednja strana.



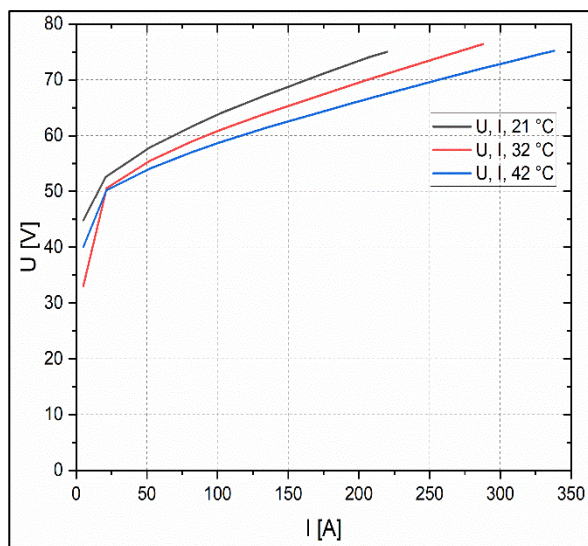
Slika 10. Izgled ispravljača - zadnja strana.

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 manji od 75 V. Tada čistoća vodonika na izlazu, iznosi 99.5%. Prvo su snimljene statičke karakteristike oba elektrolizera, pri različitim temperaturama (slike 11 i 12). Ove statičke karakteristike govore da se najprostiji model elektrolizera može napraviti kao redna veze elektromotorne sile i otpornosti koja predstavlja strminu karakteristike.

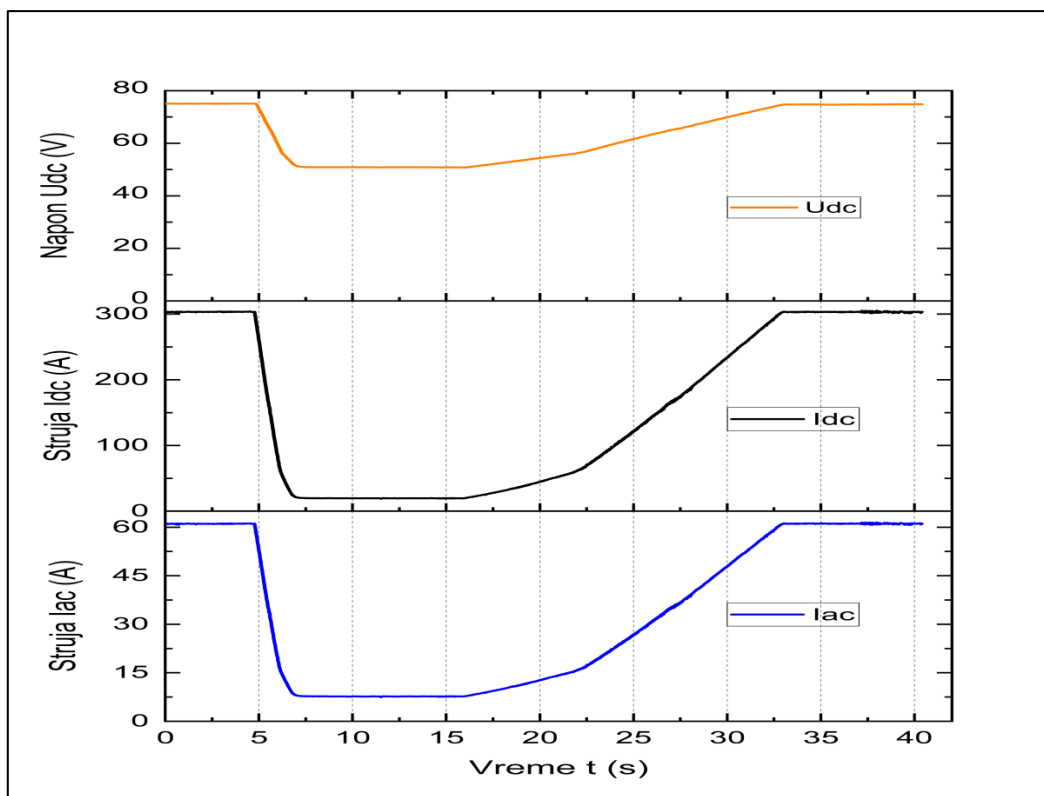


Slika 11. Statička karakteristika elektrolizera 1.



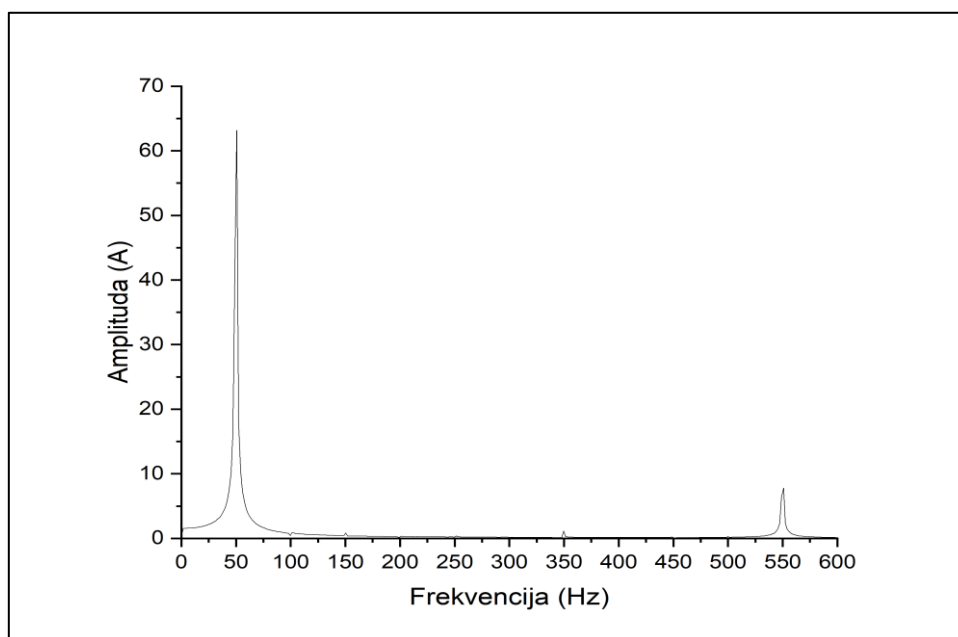
Slika 12. Statička karakteristika elektrolizera 2.

Konstruisana je namenska mikrokontrolerska ploča koja generise upaljačke impulse za tiristorski most, reguliše izlazne parametre i ima HMI funkciju. Regulacija izlazne veličine se vrši primenom PID regulatora. Uzimajući specifičnosti rada postrojenja za elektrolizu, formiran je i program regulacije izlaznih veličina. Obzirom 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 UI stepene. Dok je elektrolizer hladan, pri nominalnim naponskim karakteristikama struja je relativno mala, i u tom delu se vrši naponska regulacija ("U" režim), tako da se ne pređe maksimalno dozvoljeni napon (75V u slučaju konkretnih elektrolizera, što je preporuka proizvođača) a 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. Vremenom elektrolizer se 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 statickih karakteristika (slike 11 i 12) se vidi 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 rashladne vode itd.). Na slici 13 su prikazane srednja vrednost napona (U_{dc}) i struje (I_{dc}) jednog elektrolizera i efektivna vrednost mrežne struje (I_{ac}) pri promeni izlazne struje elektrolizera sa 300A na 20A i nazad na 300A, pri temperaturi elektrolizera od 42 °C.



Slika 13. Napon i struje ispravljača pri promeni izlazne struje u opsegu 300A-20A-300A.

Napon napajanja ispravljača je bio konstantan (3×400 Vac), i nije grafički prikazan. Sa slike 13 se može 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 14). Ostvareni ripl struje pri 300 A na elektrolizeru je oko 2%, dok je ripl napona 0.2 %. Stepenn korisnog dejstva ispravljača je 86 %.



Slika 14. Spekatar struje sa strane mreže pri struji elektrolizera od 300 A.

5 ZAKLJUČAK

Uspešno je realizovano postrojenje za napajanje dva elektrolizera sa dva dvanaestopulsna ispravljača bez interfazne prigušnice. Specifičnost topologije 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 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 omogući dodatni razvoj energetske elektornike u Srbiji.

6 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.

IMPLEMENTATION OF A TWELVE-PULSE RECTIFIER WITHOUT AN INTERPHASE TRANSFORMER FOR SUPPLYING HYDROGEN GENERATING ELECTROLYZER

Nikola Kovačević*, Sava Dobričić

NIKOLA TESLA INSTITUTE, BELGRADE, SERBIA

Abstract - The paper presents the realization of a twelve-pulse rectifier without an interphase transformer, powered by a transformer with two secondaries with different voltage amplitudes, intended for supplying an electrolyzer for hydrogen production, with an output power of 40kW. The analysis of the topology of the converters, theoretical considerations and practical measurements during commissioning of the device, are given. The chosen solution was compared with other currently popular solutions from the aspects of reliability, resistance to network interference and efficiency. The physicochemical characteristics of alkaline electrolytic cells for obtaining hydrogen were also analyzed. As an important energy source of the future, it is predicted that the production of hydrogen will become widespread in our country in the coming years, therefore the possibility for the wide application of converters intended for electrolysis as well as the ways of their implementation, were considered.

Key words - Twelve-pulse rectifier, Electrolysis, Hydrogen, Power quality, Special converters, Green energy

* Koste Glavinića 8a, Belgrade, nikola.kovacevic@ieent.org