

УДК: 621.314.63:621.357.1
621.314.63:661.96Никола Д. Ковачевић¹, Сава М. Добричић¹

Напајање алкалних електролизера дванаестопулсним исправљачима без интерфазне пригушнице

¹ Електротехнички институт Никола Тесла, Београд, Србија*<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.3>

Стручни рад

Кључне поруке

- Успешно су реализовани дванаестопулсни исправљачи без интерфазне пригушнице за потребе напајања електролизера за производњу водоника
- У раду је дат начин реализације напајања електролизера, уз приказ мерених електричних величина приликом пуштања новог система у рад
- Допринос рада је изабрана топологија исправљача која није широко позната
- Реализација овакве врсте напајања за алкалне електролизере представља јединствен искорак домаће струке у производњи водоника, за који се сматра да ће бити гориво будућности

Кратак садржај

У раду је приказана реализација дванаестопулсног исправљача без интерфазне пригушнице, напајаног путем трансформатора са два секундара различитих амплитуда напона, намењеног за напајање електролизера за производњу водоника, излазне снаге 40 kW. Дати су анализа топологије претварача, теоријска разматрања и практична мерења приликом пуштања уређаја у рад. Изабрано решење је упоређено са другим, тренутно популарним, решењима са аспекта поузданости, отпорности на мрежне сметње и степена искоришћења. Сагледавајући водоник као значајан енергент будућности, предвиђа се да ће наредних година његова производња постати широко распрострањена и у нашој земљи. Стога је овде разматрана и могућност за широку примену претварача и електролизера, као и концепти примене водоника у електроенергетском систему.

Кључне речи

Дванаестопулсни исправљач, електролиза, зелена енергија, производња водоника, специјални претварачи

Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Реализација дванаестопулсног исправљача без интерфазне пригушнице за напајање електролизера за производњу водоника” (<https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/cigre37-b4-12/>), награђеног у Студијском комитету СТК-Б4 HVDC и енергетска електроника, на 37. Саветовању CIGRE Србија, Златибор, 26-30. маја 2025.

Примљено: 11. фебруар 2026. Рецензирано: 9. јун 2026.
Измењено: 19. јул 2026. Одобрено: 21. јул 2026.

*Никола Ковачевић, +381/64-82-43-858

Имејл: nikola.kovacevic@icent.org

1. УВОД

Последње две деценије зелени извори енергије привлаче значајну пажњу, како стручне тако и шире јавности. Зеленим изворима енергије обично се сматрају сви извори енергије и горива која потичу из природних извора (сунчева светлост, ветар, вода итд.), а својом употребом не нарушавају животну средину. Водоник је у јавности често сматран зеленим извором енергије, пре свега због чињенице да својим сагоревањем сем енергије производи само водену пару као нуспродукт. Ипак, 96% тренутне светске производње водоника потиче из нафтне и хемијске индустрије. Нешто мање од 1% укупно произведеног водоника, добијено процесом електролизе воде, заправо је зелени водоник у правом смислу и то само уколико се електрична струја за њене потребе добија из обновљивог извора електричне енергије, [1]. Водоник се може добити на више начина, а неки од њих су: пиролиза угљоводоника, електролиза воде, парна реформација природног гаса итд.

Сам процес електролизе воде представља електрохемијски поступак којим се вода разлаже на водоник и кисеоник, дејством електричне струје која кроз њу пролази. Један од типова електролизе, који је од интереса за овај рад, јесте алкална електролиза. Она подразумева пропуштање једносмерне струје између аноде и катоде, које су уроњене у алкални раствор. Тада се молекул воде раздваја на молекуле кисеоника и водоника, при чему се водоник издваја на катода, а кисеоник на аноди. Уређаји који садрже редно наслагане сетове анода и катода, намењени за производњу водоника процесом алкалне електролизе, називају се алкални електролизери, Слика 1. Поред електролизера са алкалним раствором (*AEC*, енгл. *Alkaline Electrolyzer*), постоје и електролизери са јонско-измењивачком мембраном (*AEM*, *Anion Exchange Membrane*), са протон-измењивачком мембраном (*PEM*, *Proton Exchange Membrane*), као и електролизери са чврстим оксидом (*SOEC*, *Solid Oxide Electrolysis Cell*), [2]. Прва три типа функционишу на нижим температурама до 100°C, а електролизери са чврстим оксидом раде на температурама од типично 900°C. У овом раду су анализирани само алкални електролизери у којима се налази водени раствор калијум-хидроксида.

У савременој енергетској транзицији која иде ка потпуној декарбонизацији и употреби зелених извора енергије водоник заузима значајно место. Сматра се да ће бити један од најзначајнијих енергената будућности. Такође, очекује се да до 2050. године електролиза воде буде начин за добијање 60% укупно произведеног водоника, [2]. Мана овог процеса јесте висока цена, што представља тренутно главну препреку за њено интензивно омасовљење.



Слика 1. Изглед алкалног електролизера

2. ЕНЕРГЕТСКИ ПРЕТВАРАЧИ ЗА ЕЛЕКТРОЛИЗУ ВОДЕ

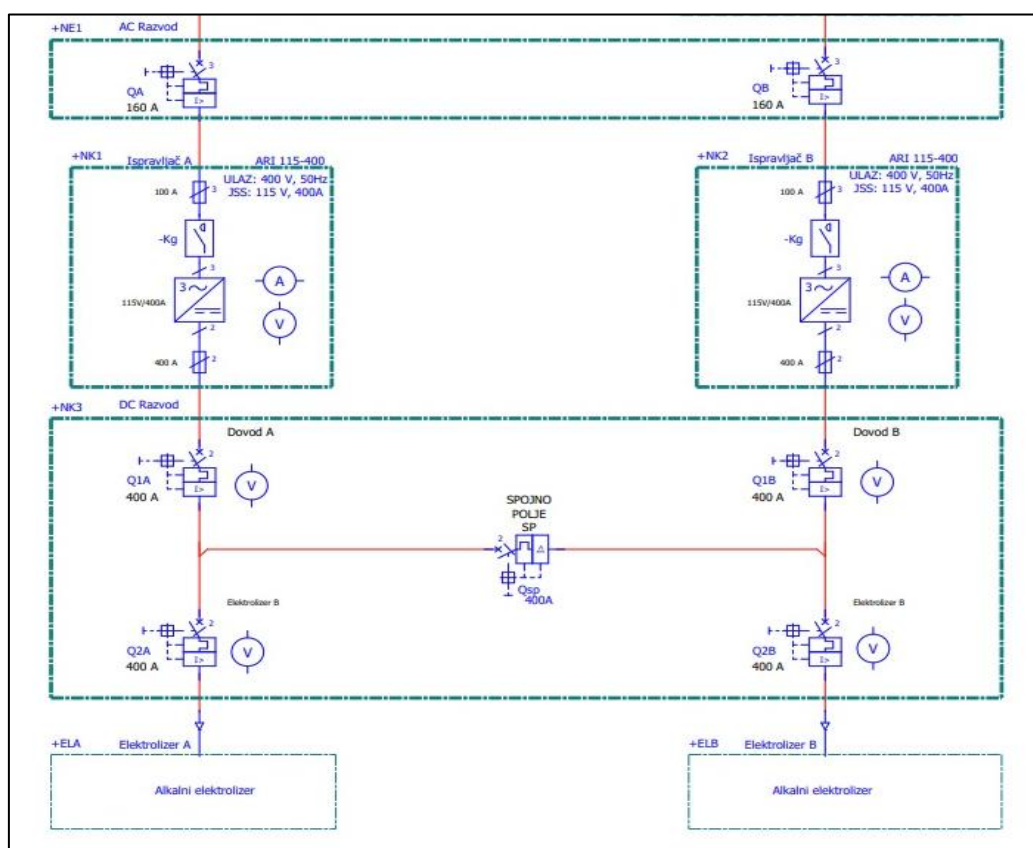
У досадашњој пракси постоји више различито примењених топологија претварача. У употреби су и транзистори и тиристори као прекидачки елементи. У општем случају претварачи могу бити реализовани као једностепени (AC-DC) и двостепени (AC-DC/DC-DC), [2]. У широкој употреби овакви претварачи раде са великим струјама, стога је употреба тиристора повољнија, јер они могу бити реализовани за веће струје од транзистора. Такође, предност тиристорске топологије у односу на транзисторску је и у њеној робустности и већој поузданости. Од тиристорских топологија које се данас користе у употреби су шестопулсни, дванаестопулсни редни и паралелни претварачи, као и двадесетчетворопулсни претварачи. Према информацијама које су доступне ауторима, топологија која је у раду приказана није у широј употреби. Избором дванаестопулсног исправљача без интерфазне пригушнице добија се на робустности и поузданости уређаја, што се у конкретном задатку очекивало и тиме пресудно утицало на избор топологије претварача. У општем случају важи – што је излазна струја са мањим риплом, то су губици у самом електролизеру мањи, те је одабрана топологија боља од шестопулсног претварача, док су од ње бољи високофреквентни претварачи. Такође, високофреквентни претварачи поседују и већи степен корисног дејства и бољи хармонијски спектар мрежне струје. Данашњи претварачи који се користе за електролизу воде најчешће су снаге до неколико мегавата и могу бити повезани на мреже ниског или средњег напона, [2].

3. ТОПОЛОГИЈА ДВАНАЕСТОПУЛСНОГ ИСПРАВЉАЧА БЕЗ ИНТЕРФАЗНЕ ПРИГУШНИЦЕ

За потребе производње водоника, намењеног за хлађење генератора у термоелектрани, израђено је електропостројење за напајање електролизера једносмерном струјом. Састоји се од наизменичног развода, два идентична исправљача и једносмерног развода, преко кога се напајају два алкална електролизера (слике 2 и 3). Сваки од електролизера се састоји од 30 хелија. Тиме је извршена замена старих мотор-генераторских група новим статичким претварачима. Исправљачи су дванаестопулсни, без интерфазне пригушнице, снаге по 40 kW. Максимални напон је $U = 115 \text{ Vdc}$, док је максимална струја $I = 400 \text{ Adc}$.



Слика 2. Ново постројење за напајање електролизера



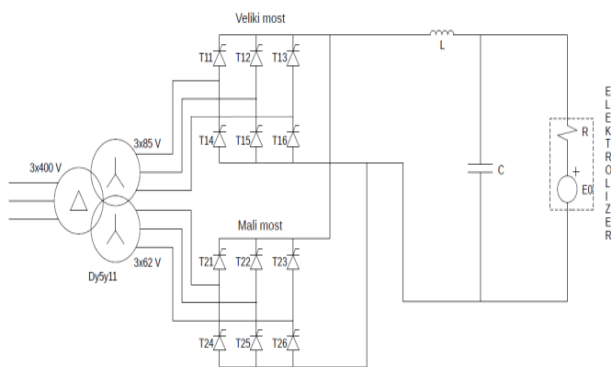
Слика 3. Једнополна шема постројења за напајање електролизера

Наизменични развод (Развод АС, Слика 3) састоји се од два прекидача наизменичне струје који доводе напон $3 \times 400 \text{ V}$ на припадајући исправљач. Једносмерни развод се састоји од пет прекидача једносмерне струје (Развод DC, Слика 3). Сваки исправљач и сваки електролизер има свој прекидач, док пети прекидач представља спојно поље, које оставља могућност укрштања исправљача и електролизера. Прекидачима се командује ручно, у искљученом стању исправљача. У случају употребе спојног поља, у раду може бити само један исправљач и један електролизер. За потребе несметаног рада

постројења, довољно је да ради само један пар исправљач-електролизер.

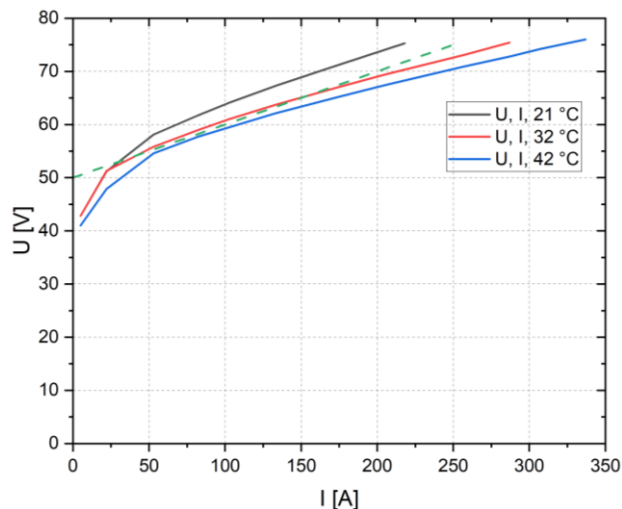
Енергетски део исправљача се састоји од тронамотајног трансформатора спреге Ду5у11, малог и великог тиристорског моста, и излазног LC филтра. Принципијелна шема исправљача приказана је на Слици 4. Поред тога, претварач поседује и расклопну опрему, командно-сигналне елементе, микропроцесорски регулатор са заштитима, као и екран осетљив на додир. Напон примара трансформатора је 400 V. Међуфазни напон секундара, са кога се напаја велики тиристорски мост, износи 85 V, док је међуфазни напон терцијара 62 V и са њега

се напаја мали тиристорски мост. Дакле, трансформатор на излазу има две амплитудски неједнаке „звезде”. Такође, није имплементирана интерфазна пригушница, као код већине дванаестопулсних топологија. У колу постоји редна пригушница, која са излазним кондензаторима образује LC филтар и смањује рипл напона. Одговарајућом секвенцом паљења тиристора малог и великог моста на излазу добија се регулисани таласни облик напона својствен дванаестопулсним исправљачима (у диодном режиму постоји дванаест једнаких калота). Одабиром спреге трансформатора и његових напона секундара и терцијара, као и адекватним паљењем тиристора, постиже се да је векторски збир два фазна напона велике звезде (секундар трансформатора) једнак векторском збиру фазних напона велике и мале звезде (терцијер трансформатора). Оваквом топологијом и секвенцом паљења тиристора постиже се елиминација петог и седмог хармоника струје, са стране мреже. Такође изостанак интерфазне пригушнице (или трансформатора) представља предност овакве топологије.



Слика 4. Топологија исправљача са моделом алкалног електролизера

Електролизер је моделован као редна веза контраелектромоторне силе (E_0) и редног отпорника (R). Та карактеристика, која личи на диодну, добијена је линеаризацијом статичке карактеристике електролизера, (испрекидана линија на Сlici 5) и представља најпростији модел, довољно добар за димензионисање енергетске опреме претварача. Статичка карактеристика је температурно зависна, али ју је могуће усредњити и тиме додатно упростити модел. Са Сlike 5 може се видети да је коришћен модел где је $E_0 = 50 \text{ V}$, а $R = 0,1 \Omega$. У општем случају, отпорност која фигурише у моделу је температурно зависна и опада са порастом температуре и обрнуто.



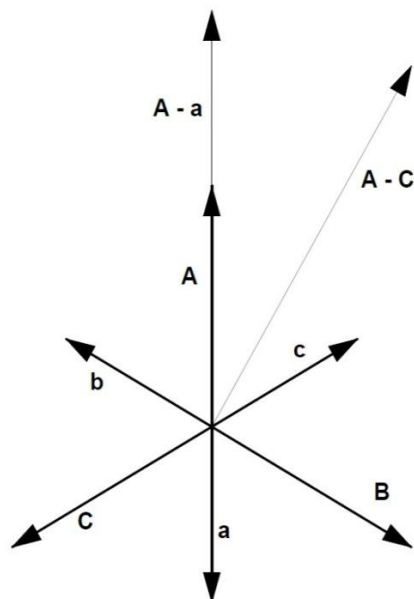
Слика 5. Статичка карактеристика електролизера са линеаризованом карактеристиком модела

На Сlici 6 приказан је векторски дијаграм фазних напона на улазу малог моста (**a**, **b** и **c**) и на улазу великог моста (**A**, **B** и **C**). Вектори напона ће овде бити означавани болдованим словима. Дакле, вредности напона секундара и терцијера трансформатора (улазни напони великог и малог моста, респективно) тако су одабране да је могуће адекватним паљењем тиристора у гранама малог и великог моста добити дванаестопулсни облик напона на једносмерној страни исправљача. Када проводе тиристори T11 и T21 (Слика 4), тада је напон на једносмерној страни исправљача једнак разлици вектора напона **A-a**, након чега комутују и струју проводе тиристори T11 и T16 и тада је излазни напон једнак разлици вектора **A-C**. Даљим одговарајућим паљењем тиристора малог и великог моста образује се систем од дванаест идентичних вектора, који чине излазни напон исправљача. Услов рада овакве топологије је следећа једнакост по модулу:

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

Једнакост (1) представља суштину рада оваквог претварача и кроз њу се може увидети принцип рада ове топологије. Такође, као и код других дванаестопулсних топологија, из мреже се елиминишу пети и седми хармоник струје. Када се на излазу формира дванаестопулсни сигнал, он се филтрира излазним LC филтром и тиме додатно исправља. Величина излазног филтра зависи од жељеног рипла напона и струје на електролизеру. У конкретном случају, одабрана је индуктивност пригушнице $L = 0,1 \text{ mH}$ и капацитивност кондензатора $C = 9400 \mu\text{F}$, што омогућава да рипл излазне струје буде испод захтеваних 3%.

На сликама 7 и 8 дат је изглед исправљача са предње и задње стране. На предњој страни (Слика 7) уочавају се улазни осигурачи AC са контактором, и излазни осигурачи DC, у дну слике. У горњем делу слике налази се управљачка електроника, а изнад ње је мали тиристорски мост.



Слика 6. Векторски дијаграм напона исправљача



Слика 7. Изглед исправљача – предња страна

На Слици 8 са задње стране уређаја постављен је трансформатор на дну, на средњој „полици“ су излазна пригушница и кондензатори (LC филтер), док је у горњем делу велики тиристорски мост. Имплементиране су и заштите од брзих комутационих пренапона у виду RC кола (*Snubber*) на оба тиристорска моста (малом и великом). Као заштита тиристора од кратких спојева постављени су и

ултрабрзи осигурачи на наизменичној (улазној) страни малог и великог моста.

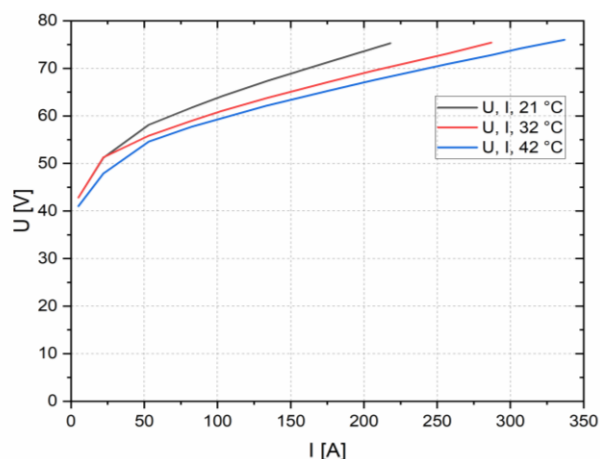


Слика 8. Изглед исправљача – задња страна

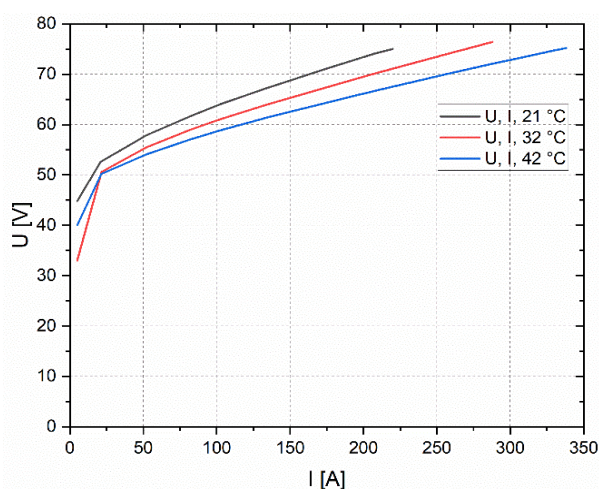
4. МЕРЕЊА УЛАЗНО-ИЗЛАЗНИХ ВЕЛИЧИНА И АНАЛИЗА РАДА ИСПРАВЉАЧА

Приликом пуштања уређаја у рад извршена су мерења улазне фазне струје, улазног фазног напона, излазне једносмерне струје и излазног једносмерног напона. Мерења су вршена мерно-аквизиционим системом са фреквенцијом одабирања од 5 kHz. Оба електролизера су покренута из хладног стања, а мерења су вршена све време, до постизања оптималне радне тачке, за коју се има струја од приближно 320 A и напон нешто мањи од 75 V. Тада чистоћа водоника на излазу износи 99,5%. Прво су снимљене статичке карактеристике оба електролизера, при различитим температурама (слике 9 и 10). Ове статичке карактеристике потврђују да се најпростији модел електролизера може направити као редна веза електромоторне силе и отпорности која представља стрмину карактеристике.

Н. Ковачевић, С. Добричић: Напајање алкалних електролизера дванаестопулсним исправљачима без интерфазне пригушнице



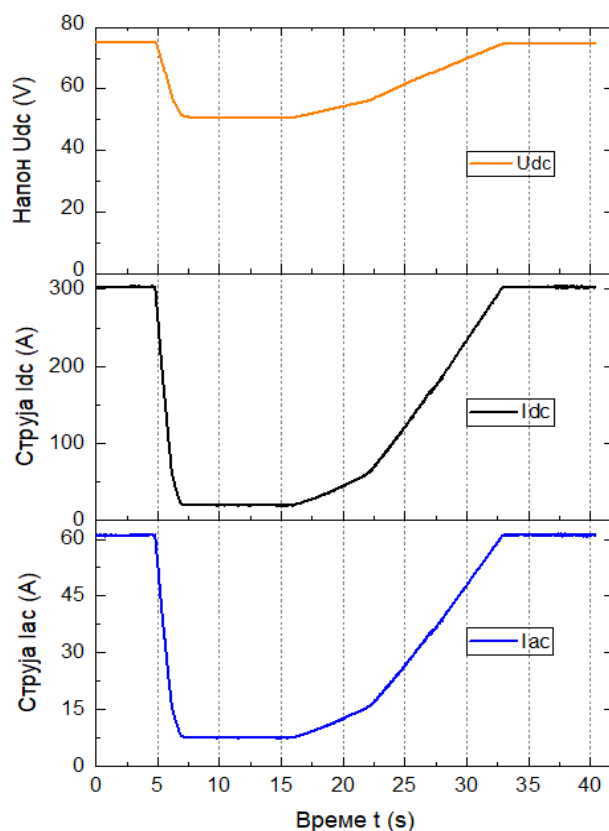
Слика 9. Статичка карактеристика електролизера 1



Слика 10. Статичка карактеристика електролизера 2

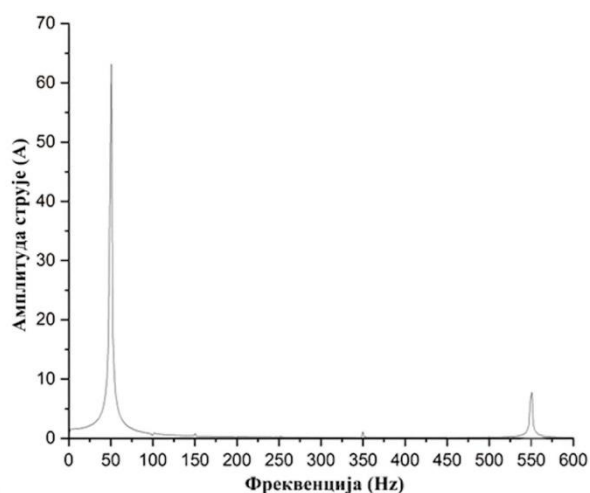
Конструисана је наменска микроконтролерска плоча која генерише упаљачке импулсе за тиристорски мост, која регулише излазне параметре и има НМІ функцију. Регулација излазне величине се врши применом PID регулатора. Узимајући у обзир специфичности рада постројења за електролизу, формиран је и програм регулације излазних величина. С обзиром на то да због технолошке изведбе не постоји предгревање електролизера већ је, напротив, од старта присутно хлађење расхладном водом, као и чињенице да се у старту постројења (све док се не постигну радни параметри) произведени водоник не складишти (већи удео нечистоћа), програм регулације је дефинисан кроз U-I режиме. Док је електролизер хладан, при номиналним напонским карактеристикама струја је релативно мала, и у том делу се врши напонска регулација (тзв. U-режим), тако да се не пређе максимално дозвољени напон (75 V у случају конкретних електролизера, што је препорука произвођача), а да се истовремено оствари највећа могућа струја (најбрже могуће загревање

електролизера, тј. најкраћи улазак у радни режим). У том делу нелинеарност U-I карактеристике није од значаја, у смислу регулације, јер динамика самог регулатора са динамиком исправљача далеко надмашује динамику самог процеса електролизе. С временом се електролизер загрева и струја природно расте, иако је активан напонски режим регулације. Када се постигну услови, регулатор прелази у мод регулације струје (I-режим), док U-регулација остаје активна као сигурносна мера, у случају пробоја неке ћелије електролизера, поремећаја у густини електролита и сл. Са статичких карактеристика (слике 9 и 10) види се да је у широком опсегу већих струја U-I карактеристика практично линеарна, што значи да у погледу регулације доминира резистиван карактер електролизера. Нагиб карактеристике одређен је радном температуром електролизера. Динамика њене промене је изузетно спора у поређењу са динамиком претварача јер зависи од више параметара (температура амбијента, проток и температура долазне воде итд.). На Слици 11 приказане су средња вредност напона (U_{dc}) и струје (I_{dc}) једног електролизера и ефективна вредност мрежне струје (I_{ac}) при промени излазне струје електролизера са 300 A на 20 A и назад на 300 A, при температури електролизера од 42 °C.



Слика 11. Напон и струје исправљача при промени излазне струје у опсегу 300A-20A-300A

Напон напајања исправљача је био константан ($3 \times 400 \text{ V ac}$), и није графички приказан. Са Сlike 11 може се уочити и резистивни карактер оптерећења електролизера. Спектралном анализом струје мреже која се има при струји електролизера од 300 А, може се видети да су пети и седми хармоник заиста потиснути (Слика 12). Остварени рипл струје при 300 А на електролизеру је око 2%, док је рипл напона 0,2%. Степен корисног дејства исправљача је преко 86% (рачунато при излазном напону од 75 V и струји од 320 А, што представља и најчешће радно стање електролизера и исправљача).



Слика 12. Спектар струје са стране мреже при струји електролизера од 300 А

5. ПРАВЦИ РАЗВОЈА ПРОИЗВОДЊЕ ВОДОНИКА ЕЛЕКТРОЛИЗОМ ВОДЕ

Тренутни правци развоја производње водоника путем електролизе су разнолики. Један од главних циљева јесте појевљење процеса производње, тј. свођење цене овако добијеног водоника на нивое дизел-горива. Доминантни кораци у том правцу јесу увођење нових типова електролизера (РЕМ и SOEC, поред класичних алкалних) и подизање ефикасности претварача за њихово напајање једносмерном струјом.

5.1. Развој електролизера

Паралелно са развојем енергетских претварача, тече и развој самих електролизера. Доминантан је и даље алкални тип, с обзиром на то да је то технологија усавршавана и позната дуги низ година. У последње време, РЕМ електролизери добијају на значају у пракси, док истраживачки радови иду у правцу развоја електролизера са чврстим оксидом (SOEC). Тренутни степен развоја омогућава ефикасност конверзије од 60% до 80% код алкалних, 70-80% код РЕМ, [4] и >

90% код SOEC електролизера (експериментална истраживања, реална имплементација се тек очекује), [5].

Наравно, не треба заборавити да на ефикасност конверзије електричне струје у водоник утиче и ефикасност осталих помоћних система, као што су системи за његово пречишћавање и компресију.

Како постоји много ефеката који утичу на ефикасност електролизе, постоји и много праваца у којима су могућа побољшања. Тренутно говоримо о укупној ефикасности процеса реда од 60% до 80%, са циљем да у блиској будућности она буде и преко 80%. На том нивоу ефикасности процеса већ је могуће постићи цену водоника у рангу фосилних горива, што ће значајно убрзати развој технологија производње и складиштења.

5.2 Развој напајања

Неизоставни део сваког система за електролизу јесте и енергетски претварач за напајање. Ти претварачи су у суштини извори једносмерног напона и једносмерне струје, при чему је напон дефинисан одабиром броја ћелија електролизера, а струја конструкцијом и типом саме ћелије електролизера, тј. жељеном густином једносмерне струје. Данас су на индустријском нивоу доминантни тиристорски претварачи, најчешће у 12-пулсним и 24-пулсним конфигурацијама. Ове конфигурације су се показале као робусно решење, а истовремено и скалабилно у широком опсегу снага, почев од реда неколико kW па све до више MW. Ипак, тиристорски претварачи имају одређене проблеме, пре свега у постојању наизменичне компоненте у једносмерној струји, релативно ниском THD-у и повећаном садржају ниских хармоника. Ови проблеми се најчешће решавају имплементирањем активних и пасивних филтера који, са друге стране, не само што подижу цену него и смањују ефикасност конверзије. На нивоима нижих и средњих снага, високофреквентни AC/DC претварачи већ сада показују боље карактеристике у погледу степена корисног дејства и одсуства хармоника у генерисаној једносмерној струји, док ценовно не одступају превише од тиристорских решења. За високе снаге примењује се концепт модуларних претварача, где се уместо једног примењује паралелна веза више модула, и тиме се, сем потребне снаге, постиже и одређена редунданса у раду. Овај концепт, за сада, не може да по цени конкурише решењима са тиристорским претварачима, али се велики део истраживања усмерава у том правцу.

Реализовано и у овом раду описано напајање електролизера, може се унапредити, повезивањем соларне електране и DC-DC претварача, који би

сунчеву енергију користили за смањење електричне енергије која се узима из мреже преко постојећих исправљача, [6]. Тиме би се подигла ефикасност самог постројења, смањило загађење животне средине и смањили трошкови производње водоника.

5.3. Водоник у електроенергетском систему будућности

Изузев употребе у виду алтернативног горива, све више на значају добија идеја употребе водоника као медијума за складиштење енергије. Тренутно, употреба обновљивих извора, попут солара и ветра, у генерисању електричне енергије доживљава врхунац, понегде и надмашујући ниво производње из класичних извора, као што су фосилна горива и хидропостројења. И поред бројних предности, тако велико учешће соларних и ветрогенератора изазвало је низ нових проблема у електроенергетским системима. Зависност производних могућности од фактора који нису под контролом човека доводи до тога да управљање електроенергетским системом постаје све компликованије. Проблеми робустности и стабилности, који су раније имали један начин решавања, сада добијају сасвим нову димензију, до те мере да могући сценарији предвиђају потпуне распаде система као последице интермитентне производње која је основна карактеристика соларних и ветроелектрана.

Као стубови одбране од нестабилности система, у циљу балансирања мреже, поред класичних турбогенератора, и постројења за складиштење енергије имају одлучујућу улогу. Данас примењивана решења јесу реверзибилне електране, батеријска постројења и механички акумулатори (замајци), [7].

Реверзибилне хидроелектране захваљујући свом капацитету представљају примарни облик акумулирања енергије. Са тачке управљања, лако се интегришу у надређени систем регулације фреквенције и напона мреже, али највећа им је мана (поред цене изградње) та да захтевају специфичне геолошке и хидролошке услове, те су подложне климатским променама (недостатку воде).

Батеријска постројења су добила доста на значају падом цена и развојем технологија батерија које служе као медијум за акумулирање енергије. Великом брзином реаговања способне су да допринесу регулацији фреквенције, али их мала густина енергије по јединици запремине чини неефикасним у погледу компликоване изведбе код апликација већих снага. Напредак технологије у изради батерија требало би да превазиђе оба проблема, нпр. релативно брзо се

очекује да ће се са садашњих 250 Wh/kg, [8], густина енергије батерија подићи на ниво од 500 Wh/kg, [9].

Електромеханички акумулатори у облику замајца су способни да брзо предају активну снагу мрежи, али су ограничени како по нивоу те снаге тако и по количини ускладиштене енергије. За њихову ефикасну примену потребно је изградити велики број оваквих јединица, што углавном доводи до тога да се технолошка оправданост губи пред економском.

Као алтернатива свим овим технологијама и техничким решењима, већ дуже време постоји идеја да се водоник искористи као медијум за складиштење енергије. Вишак произведене електричне енергије из обновљивих извора, као што су соларне и ветроелектране, користио би се за напајање електролизера, производњу и складиштење водоника, у сврху његове накнадне употребе (у тренуцима када је то неопходно) за генерисање електричне енергије, путем горивих ћелија или гасних турбина, [10]. Оваква решења су скалабилна, тако да мултипликовањем постројења практично не постоје ограничења у акумулираној енергији и снази. Иако идеја делује једноставно, постоји низ отежавајућих околности које спречавају једноставну и економски оправдану примену. Рецимо, процес електролизе за постизање оптималне радне тачке (у смислу губитака) захтева одређене услове, који су често у супротности са начином на који соларна и ветропостројења генеришу електричну енергију. И соларна и ветропостројења представљају изузетно непостојане изворе електричне енергије, у којима производња у времену варира између 0% и 100% номиналног капацитета. Директним спрезањем би средња вредност једносмерне струје варијала у наведеном опсегу. И код алкалних и код РЕМ електролизера постоји природни ефекат који у случају да густина струје кроз мембране није у оптималним опсезима чини да се межурићи генерисаног водоника лепе за мембране електролизера и тиме повећавају омску отпорност (и топлотне губитке), смањују ефективну површину мембране ћелије, односно густину струје. Ово последње варира како са избором материјала за мембране ћелија електролизера тако и са типом електролита који се користи, као и са радним притиском, али пре свега са густином струје, где се при њеним оптималним густинама природним ефектом врења убрзава одвајање межурића водоника од површине ћелијске мембране, [11]. Овај ефекат између осталог чини да постоје оптимални режими рада, тачније оптималне густине струје у којима електролизери треба да раде да би остварили максималну ефикасност процеса. Различити типови електролизера су у различитој мери подложни утицају ове појаве на губитке. Рецимо, код већине

произвођача, за алкалне електролизере опсег рада варира између 40% и 100% номиналне струје, мада неки произвођачи тврде да се та граница може спустити и на 20%. Према [12], типови РЕМ способни су да раде у нешто ширим опсезима густина струја, поједини произвођачи наводе податак о чак 0% до 100%, што их чини добрим избором у комбинацији са напајањем из соларних или ветроелектрана, [13].

Конверзија „електрична енергија – водоник – електрична енергија” има укупну ефикасност од око 40%, што је ниже него код употребе класичних батеријских складишта, али се исплати код великих постројења, због дужег животног века у односу на батеријска складишта, [10].

6. ЗАКЉУЧАК

Успешно је реализовано постројење за напајање два електролизера са два дванаестопулсна исправљача без интерфазне пригушнице. Специфичност топологије ових претвараача, где се комутације тиристора обављају како унутар једног моста тако и између тиристора малог и великог моста, представља квалитет топологије која до сада није била широко доступна. Већина дванаестопулсних исправљача представља или редну или паралелну везу тиристорских мостова и углавном садржи интерфазну пригушницу или трансформатор. Искуства стечена у раду са електролизерима представљају додатни квалитет, имајући у виду да у Србији готово да не постоје електролизне станице или су оне малих снага, претежно лабораторијског типа. Водоник који је доступан на нашем тржишту је већински увезен из иностранства или је добијен у хемијској индустрији као нуспродукт. Може се слободно констатовати да у Србији постоји значајан простор за бављење електролизом са аспекта претвараачких јединица, који ће се засигурно у будућности све више повећавати. Као гориво будућности, водоник представља шансу за енергетску транзицију. У нашој земљи не постоји довољан број стручњака из те области како би испратили светске трендове раста потреба за водоником. Примена претвараача у ове сврхе тек треба да доживи своју експанзију и омогући додатни развој енергетске електронике у Србији.

ЛИТЕРАТУРА

- [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

БИОГРАФИЈЕ



Никола Ковачевић је рођен 1994. године у Београду. Завршио је основне и мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, на смеру за Енергетику. Након завршених студија, започиње професионалну каријеру и од 2019. године је запослен у

Електротехничком институту „Никола Тесла” у Београду, у Центру за аутоматику и регулацију. Тренутно је на позицији стручног сарадника. Током рада, учествовао је у пројектовању, изради и пуштању у рад специјалних наменских уређаја енергетске електронике, побудних система великих синхроних мотора, исправљача, система средњенапонске преклопне аутоматике и уређаја за синхронизацију синхроних генератора. Од 2019. године је студент докторских академских студија на Електротехничком факултету у Београду. Аутор је више стручних и

научних радова из области енергетске електронике. Члан је CIGRE Србија, СТК Б4.

ORCID: 0009-0004-9864-5305



Сава Добричић је рођен 1970. године у Аранђеловцу. Завршио је Електротехнички факултет 1996, стекавши звање дипломираног инжењера електротехнике. Од 1998. године запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла”, где и данас ради у звању стручног саветника. Поља

његовог деловања су *embedded* системи управљања, енергетски претварачи средњих и великих снага, системи управљани PLC-овима и SCADA системима за контролу и мониторинг, развој претварача за напајање електролизера за производњу водоника и кисеоника као и проблеми регулације токова реактивних снага и напонских прилика у електроенергетским системима. Води пројекте развоја уређаја енергетске електронике. Аутор је и коаутор више радова из ових области.

ORCID: 0009-0003-7115-9887

Nikola 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 rectifier

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/10.2478/2025.0000000000000000>), awarded in the Expert Committee EC-B4 HVDC and Power Electronics, at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, 26-30 May 2025.

Received: 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