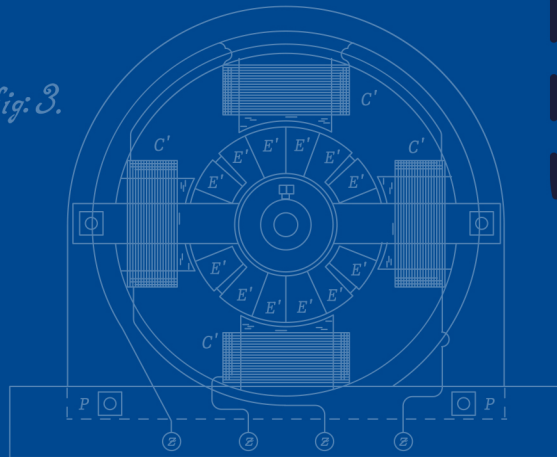




fig. 3.



1.119.732

APPARATUS FOR TRANSMITTING
APPLICATION FILED JAN. 19, 190

ISSN 3009-2892 (Online)

УДК 620.9
621.31

Електропривреда

Electric Power Industry Journal

2026

Година 4, Број 2
Volume 4, Issue 2

WITNESSES
M. Lawson Esq.
Benjamin Miller

СПЕЦИЈАЛНО
ИЗДАЊЕ





Електропривреда

Electric Power Industry Journal



Научно-стручни часопис Акционарског друштва „Електропривреда Србије”
у суиздаваштву са Електротехничким институтом „Никола Тесла” Београд



Година 4, Број 2

Садржај

Импресум

Реч Уредништва и гостујућег уредника

91-92

Чланци

Душан Јоксимовић, Ђорђе Стојић, Немања Милојчић, Зоран Ћирић,
Славко Веиновић, Лука Ивановић, Илија Класнић, Мирослав Павићевић,
Душан Тришић

Структура и динамичке перформансе редундантних система побуде
мотор-генератора у РХЕ „Бајина Башта”

93-113

Јелица Јанићијевић, Данило Влаховић, Александар Латинковић, Жељко Ђуришић

Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2
ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим
изворима енергије

114-132

Никола Ковачевић, Сава Добричић

Напајање алкалних електролизера дванаестопулсним исправљачима без
интерфазне пригушнице

133-143

Мирослав Поповић, Александар Милић, Никола Мирковић

Моделовање губитака GaN прекидача на основу каталошких података

144-156

Урош Његован, Зоран Стојановић, Александар Марјановић

Ограничење склопних транзијената применом технике контролисаног
укључења прекидача (Point-on-Wave)

157-171

Марија Ђорђевић, Срђан Младеновић, Ивана Стаменић, Бранко Шумоња

Имплементација европских процеса у оперативни рад ЕМС АД

172-183

Додатак – прилози

Уређивачка политика и тематске области часописа	184-184
Категоризација (рангирање) рукописа	185-185
Детаљно упутство ауторима о начину припреме чланка	186-190
<i>In memoriam</i> – Проф. др Владимир Катић	191-191
Прилог: Извод из библиографије проф. др Владимира Катића	192-195

ИЗВРШНИ ИЗДАВАЧ

АКЦИОНАРСКО ДРУШТВО „ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА СРБИЈЕ” БЕОГРАД

11 000 Београд, Балканска 13

Електронска презентација: www.eps.rs

Телефон Уредништва: +381-11-365-23-63

Имејл: epijournal.editor@eps.rs

Веб-платформа Часописа: <https://epijournal.eps.rs>

СУИЗДАВАЧ

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ИНСТИТУТ „НИКОЛА ТЕСЛА” БЕОГРАД

11 000 Београд, Косте Главинића 8а

Електронска презентација: www.icent.org

Телефон: +381-11-39-52-000

Телефакс: +381-11-36-90-487

ЗА ИЗВРШНОГ ИЗДАВАЧА

Душан Живковић, дипл. инж. ел.

Генерални директор ЕПС АД

ЗА СУИЗДАВАЧА

Др Јелена Лукић, дипл. инж. техн.

Директорка ЕТИ „Никола Тесла”

ГЛАВНИ И ОДГОВОРНИ УРЕДНИК

Др Владимир М. Шилкут, дипл. инж. ел.

ИЗДАВАЧКИ САВЕТ

Др Јелена Лукић, Електротехнички институт „Никола Тесла” Београд

Небојша Петровић, „Електромрежа Србије” АД Београд, председник CIGRE Србија

Ванр. проф. др Жељко Поповић, ФТН Нови Сад, представник CIREД Србија

Мр Ненад Шијаковић, „Електромрежа Србије” АД Београд

Мр Душан Вукотић, „Електродистрибуција Србије” ДОО Београд

Проф. др Владимир А. Катић, професор у пензији ФТН Нови Сад, председник Уређивачког одбора

Др Владимир М. Шилкут, „Електропривреда Србије” АД Београд, главни и одговорни уредник

УРЕЂИВАЧКИ ОДБОР

Проф. др Владимир А. Катић, професор у пензији ФТН Нови Сад, председник

Проф. др Драгутин Д. Саламон, професор у пензији ЕТФ Београд, заменик председника

Проф. др Александар Гајић, Академија инжењерских наука Србије (АИНС),

професор у пензији Машинског факултета Београд

Проф. др Јован Нахман, АИНС, професор у пензији ЕТФ Београд

Проф. др Никола Рајаковић, председник Савеза енергетичара Србије, професор у пензији ЕТФ Београд

Проф. др Младен Кезуновић, Texas A&M University

Проф. др Мирослав Беговић, Texas A&M University

Проф. др Јовица Милановић, University of Manchester, School for Electrical Engineering

Проф. др Владимир Терзија, Newcastle University

Проф. др Борис Думнић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Проф. др Лука Стрезоски, Факултет техничких наука, Нови Сад

Проф. др Драган Тасић, Електронски факултет, Ниш

Проф. др Лидија Коруповић, Електронски факултет, Ниш

Проф. др Драгана Животић, Рударско-геолошки факултет, Београд

Проф. др Мића Јовановић, Технолошко-металуршки факултет, Београд

Ванр. проф. др Тина Дашић, Грађевински факултет, Београд

Доц. др Јелена Поноћко, Go2Power Consulting и University of Manchester, School for Electrical Engineering

Др Ана Дајић, Технолошко-металуршки факултет, Београд

Др Драгослав Перић, хонорарни консултант, Београд

Др Саша М. Стојковић, Академија техничко-уметничких струковних студија, Београд

Др Јасна Драгосавац, Електротехнички институт „Никола Тесла”, Београд

Др Нинел Чукалевски, Институт „Михајло Пупин”, Београд

Др Милинко Радосављевић, Рударски институт, Београд

Др Марија Ђорђевић, „Електромрежа Србије” АД, Београд

Др Јасна Марковић Петровић, ЕПС АД, Београд

Др Рада Крговић, ЕПС АД, Београд

Др Владимир Ђорђевић, ЕПС АД, Београд
Др Милорад Пантелић, ЕПС АД, Београд
Др Милицав Томић, ЕПС АД, Београд
Мр Драган Влаисављевић, независни експерт за енергетику, Београд
Мр Александар Јаковљевић, ЕПС АД, Београд
Мр Никола Обрадовић, „Електромержа Србије” АД, Београд
Владан Ристић, „Електромержа Србије” АД, Београд
Радован Станић, ЕПС АД, Београд
Биљана Стекић Јовановић, ЕПС АД, Београд
Јован Илић, ЕПС АД, Београд
Милан Ђорђевић, Center for Energy Excellence, Зрењанин
Радош Чабаркапа, Електроенергетски координациони центар, Београд
Александар Латинић, Center for Energy Excellence, Зрењанин
Жељко Лазаревић, ЕПС АД, Београд

ГОСТУЈУЋИ УРЕЂИВАЧКИ ОДБОР СПЕЦИЈАЛНОГ ИЗДАЊА

(Издање посвећено најзапаженијим радовима на 37. саветовању CIGRE Србија 2025)

Небојша Петровић, председник CIGRE Србија и Стручне комисије СТК-Б2, гостујући главни уредник
Проф. др Драган Петровић, професор ЕТФ у пензији, гостујући уредник
Проф. др Драгутин Саламон, професор ЕТФ у пензији, гостујући уредник
Проф. др Богдан Брковић, ЕТФ Београд, гостујући уредник
Проф. др Томислав Рајић, ЕТФ Београд, СТК-Д1, гостујући уредник
Проф. др Жељко Деспотовић, Институт „Михајло Пупин”, СТК-Б4, гостујући уредник
Др Жарко Јанда, ЕТИ „Никола Тесла”, СТК-Б4, гостујући уредник
Др Јасмина Грбовић Новаковић, Институт за нуклеарне науке „Винча”, гостујућа уредница
Јасна Грујић, Енергопројект ЕНТЕЛ, СТК-Ц3, гостујућа уредница
Владан Цвејић, ENSACO, СТК-Б5, гостујући уредник
Дејан Стојчевски, SEEPEx, СТК-Ц5, гостујући уредник

ТЕХНИЧКО УРЕДНИШТВО

Развој, дизајн и уређивање веб-платформе

Игор Меденица (ЕД Србије ДОО)
Данило Мијатовић
Радован Брајовић

Лектура и коректура

Милеса Караџић

Преводиоци

Јасна Ђуровић
Срђан Бугарић
Ивана Јевтовић
Сунчица Ђокић Крстић
Ранка Младеновић

Технички секретаријат

Мр Ангелина Миловановић
Дејана Косановић

Часопис „Електропривреда” – *Electric Power Industry Journal*
излази двапут годишње, искључиво у електронском облику,
на <https://epijournal.eps.rs> и типа је *Open Access*



Садржај часописа доступан је у отвореном приступу, у складу са лиценцом CC BY-NC-ND 4.0:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

COBISS.SR-ID – 121874441



УВОДНА РЕЧ УРЕДНИШТВА И ГОСТУЈУЋЕГ УРЕДНИКА

Поштовани читаоци и сарадници,

Пред вама је нови број часописа „Електропривреда” – *Electric Power Industry Journal*. Као резултат наставка партнерске сарадње часописа и Националног комитета CIGRE Србија, ради се о још једном специјалном издању, у коме објављујемо проширене и унапређене рукописе шест одабраних конференцијских радова који су награђени на 37. националном саветовању ове организације, одржаном од 26. до 30. маја 2025. године, на Златибору. Еминентни стручњаци из академске заједнице и привреде, експерти у областима којима припадају теме ових радова, чланови су Гостујућег уређивачког одбора који је, у сарадњи са сталним Уредништвом часописа, прегледао и рецензирао рукописе ових чланака и припремио ово издање.

У првом чланку су приказани техничко решење, карактеристике и функционалности нових система побуде мотор-генератора у реверзибилној хидроелектрани (РХЕ) „Бајина Башта”. Замена старих система побуде обављена је у склопу недавно завршене ревитализације агрегата у овој РХЕ, кључне активности за даље очување стабилности електроенергетског система Србије и за интеграцију обновљивих извора у њега. Новоуграђени, савремени регулатори побуде омогућавају потпуну контролу агрегата у свим погонским стањима, уз високу поузданост, осигурану редувантном (1+1) архитектуром тиристорских мостова и регулаторских јединица. Рад агрегата је подржан у сва четири квадранта погонског дијаграма, уз синхрони старт и електрично кочење. На крају чланка су илустративно приказани и динамички одзиви, снимљени приликом пријемних испитивања агрегата, на основу којих су евалуирани и верификовани показатељи динамичких перформанси система.

У другом чланку је најпре дат осврт на кључне технолошке принципе, предности и ограничења савремених метода производње „зеленог” водоника, са фокусом на електролизу. Приказани су технолошки трендови који убрзавају примену водоника у енергетским системима. Потом је изложен конкретан предлог практичног, засад само идејног, решења изградње постројења за производњу и складиштење водоника као заменског горива, за евентуалне, будуће гасне турбине блокова А1 и А2 у термоелектрани „Никола Тесла”; дакле, на локалитету који већ има обезбеђену комплетну инфраструктуру. Анализирани су услови за формирање енергетског комплекса за производњу, складиштење и употребу водоника, сагледани су изазови у вези с тим и дати предлози локација објеката и опреме за снабдевање водом, електролизера и система за складиштење водоника. Стога овај рад нуди конзистентну анализу једне од потенцијалних опција за декарбонизацију електроенергетског сектора Србије.

На трагу развоја и коришћења водоничних технологија, и наредни текст разматра проблематику у вези са радом електролизера. Наиме, овај чланак даје приказ развоја и практичне реализације специфичних топологија енергетских претварача за напајање алкалних електролизера у сврху производње „зеленог” водоника. Његова посебна вредност лежи у чињеници да не приказује само теоријска разматрања или симулационе моделе, већ описује комплетно реализовано индустријско постројење снаге 40 kW, успешно пуштено у рад у оквиру термоенергетског система, за потребе хлађења генератора. Иновативност овог решења, иначе – плода рада домаћих стручњака, огледа се у специфичној, дванаестопулсној топологији без интерфазне пригушнице између два тиристорска моста. Уместо ње, користи се тронамотајни трансформатор с амплитудски неједнаким секундарним напонима. Текст чланка је богато илустрован дијаграмима и експерименталним резултатима, који потврђују претходно изнете теоријске поставке.

И следећи чланак је из области енергетске електронике. Он се бави моделовањем динамичких губитака прекидача снаге на бази галијум-нитрида (GaN), савременог полупроводника великог енергетског процепа, који се користи ради постизања високих ефикасности и велике густине снаге. За разлику од техничких решења у постојећој литератури, предложени аналитички модел симултано узима у обзир нелинеарну зависност паразитних капацитивности (C_{iss} , C_{oss} , C_{rss}) од напона дрејн-сорс, као и нелинеарну зависност транскондуктансе (g_m) GaN прекидача. Дефинисан је и примењен алгоритам који дискретизује нелинеарне криве из каталога прекидача, у више од 100 тачака, чиме се избегавају аналитичке апроксимације које уносе грешке на високим учестаностима. Кључни иновативни искорак је детаљна математичка сепарација укупне струје на струју проводног канала и на струју паразитних капацитивности. Ово раздвајање омогућава прецизну идентификацију губитака током тзв. тврдых, меких и полумеких комутационих процеса у конфигурацији полумоста. Рад поседује и високу практичну вредност, јер је предложени теоријски модел верификован коришћењем физичког прототипа синхроног спуштача напона, снаге 1 kW, који су конструисали сами аутори и спровели мерења у целом опсегу његовог радног напона.

У претпоследњем чланку је описана техника контроле тренутка укључења прекидача као мера ограничавања негативних утицаја склопних транзијената. Ово је веома актуелна тема у преносним системима. Функција контроле прекидача и потенцијални ефекти примене у преносној мрежи тестирани су у лабораторијским условима. Лабораторијска поставка се састојала од микропроцесорског уређаја за заштиту и управљање као контролера и симулатора у реалном времену (енгл. *Hardware-in-the-Loop*, HIL), на коме је реализован модел паралелне пригушнице 400 kV и прекидача. Представљени су ефекти склопних транзијената услед прикључења различитих врста оптерећења. Извршено је поређење са конвенционалним укључењем прекидача компензационе пригушнице. Лабораторијска верификација резултата додаје практичну вредност закључцима изнетим у чланку.

Последњи чланак разматра имплементацију европског регулаторног оквира и оперативних пракси у рад оператора преносног система (ОПС) у региону Западног Балкана. Приказан је начин координације процеса који се одвијају на нивоу европских оператора преносних система и главне промене које се спроводе у оперативном раду домаћег ОПС-а, „Електромереже Србије” (ЕМС АД). Два најважнија процеса су координисана анализа сигурности система и прорачуни преносних капацитета и они се усклађују са ENTSO-E. Приказан је и регулаторни процес прикључења ЕМС АД европским регионима за прорачун капацитета – CORE и SEE региону и указано је на проблеме у вези с њим. Представљени су основни концепти координисаних процеса који ће се делом реализовати у оквиру ОПС-а, а делом кроз регионалне координационе центре. При томе је неопходно испунити правило доделе 70% капацитета критичног елемента, односно интерконективних далековаода и при управљању оптерећењима унутрашњих далековаода која утичу на интерконекцију, у оквиру процеса управљања загушењима у интерконекцији Југоисточне Европе и преносној мрежи Србије. Посебна вредност овог чланка огледа се у јасном приказу тренутног стања у Европи у односу на позицију и степен имплементације у Србији, као и у идентификацији процеса и активности које је неопходно реализовати у наредном периоду. Наиме, имплементација анализираних механизма представља један од кључних предуслова за интеграцију Србије у јединствено европско тржиште електричне енергије, укључујући спајање тржишта дан-унапред и унутар-дневног тржишта, као и за прикључење европским баланским платформама.

Имајући у виду актуелност тема и иновативност конкретних решења приказаних у овим чланцима, верујемо да ће овакав садржај овог броја привући вашу пажњу и бити од користи. Највећи број чланака је у домену енергетске електронике, једне од области којој је огроман допринос дао недавно преминули председник сталног Уређивачког одбора нашег часописа, професор Владимир Катић. Уз осврт на његове импресивне каријеру и допринос струци и науци, на крају овог издања прилажемо Извод из његове обимне библиографије. Надамо се да ће у Изводу сабрани наслови послужити експертима у областима којима се професор Катић бавио, за њихова сопствена истраживања и доприносе, а тиме и додатно увећати доступност и корисност његовог научног и стручног опуса.

И овом приликом понављамо наш љубазан позив на активно учешће читалачке публике. Уредништву можете доставити рукописе чланака, али и дискусија, полемика или личних ставова у вези са већ објављеним текстовима и конкретним стручним и научним проблемима и питањима која су у њима разматрани. Радо ћемо размотрити све материјале које и убудуће будемо примали и сагледати могућности за њихово објављивање у неком од наредних издања Часописа.

У име Гостујућег уређивачког одбора
Специјалног издања Часописа,



Небојша Петровић, дипл. инж. ел.
Председник CIGRE Србија
Гостујући главни уредник

У име Уредништва часописа,



Др Владимир Шиљкут, дипл. инж. ел.
Главни и одговорни уредник

Душан Јоксимовић¹, Ђорђе Стојић¹, Немања Милојчић¹, Зоран Ћирић¹,
Славко Веиновић¹, Лука Ивановић¹, Илија Класнић¹, Мирослав Павићевић²,
Душан Тришић²



Структура и динамичке перформансе редундантних система побуде мотор-генератора у РХЕ „Бајина Башта”

¹ Електротехнички институт Никола Тесла, Београд, Србија*

² ЕПС АД, Огранак Дринско-Лимске ХЕ, ХЕ Бајина Башта, Србија

<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.1>

Стручни рад

Кључне поруке

- Ревитализација агрегата у РХЕ „Бајина Башта” кључна за стабилност система и интеграцију обновљивих извора
- Савремени регулатори побуде омогућавају потпуну контролу агрегата у свим погонским стањима уз високу поузданост осигурану редундантном (1+1) архитектуром тиристорских мостова и регулаторских јединица
- Подржан рад агрегата у сва четири квадранта погонског дијаграма уз синхрони старт и електрично кочење

Кратак садржај

Проточна хидроелектрана и реверзибилна хидроелектрана (РХЕ) „Бајина Башта” у Перућцу представљају највеће хидроенергетске објекте изграђене на реци Дрини. РХЕ „Бајина Башта” има велики значај за електроенергетски систем Србије због могућности рада у генераторском и моторном режиму, чиме повећава флексибилност система са аспекта управљања производњом и потрошњом. Такође, због своје могућности да брзо стартује и брзо промени режим рада из генераторског у моторни и обрнуто, ова електрана може брзо да реагује на поремећаје у систему и замени било који други агрегат у систему „Електропривреде Србије”. Самим тим, и ревитализација РХЕ „Бајина Башта”, која треба да продужи животног века агрегата за неколико деценија, има велики значај за електроенергетски систем. Током 2024. ревитализован је први агрегат, док је ревитализација другог агрегата завршена 2026. У оквиру ревитализације су замењени и комплетни побудни системи. У оквиру енергетског дела система побуде уграђене су квалитетне компоненте: побудни трансформатори, прекидачи, тиристорски мостови, опрема за демагнетизацију итд. Основу управљачког дела система побуде чине сертификовани дигитални регулатори побуде у оквиру којих су реализовани секвентни аутомати за све режиме рада агрегата: генераторски режим, моторни режим, синхрони старт и електрично кочење. Регулатори омогућавају различите режиме регулације: аутоматска регулација напона статора, реактивне снаге или фактора снаге уз интегрисане лимитерске функције и стабилизатор електроенергетског система. Поузданост система додатно је осигурана редундантном имплементацијом тиристорских мостова и регулатора побуде у конфигурацији 1+1. Након завршене монтаже и повезивања комплетне опреме, спроведена су детаљна подешавања и испитивања система побуде, која су показала добре перформансе система. Ово гарантује поуздан и стабилан рад агрегата у свим предвиђеним режимима, уз аутоматско ограничење рада унутар дефинисаних граница погонског дијаграма.

Кључне речи

**Мотор-генератор, поузданост,
ревитализација, систем побуде**

Примљено: 6. април 2026.

Рецензирано: 30. јун 2026.

Измењено: 9. јул 2026.

Одобрено: 14. јул 2026.

* Кореспондирајући аутор: Душан Јоксимовић, телефон: +381 64/82-59-741
Имејл: dusan.joksimovic@ieent.org

Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Системи побуде за мотор-генераторе у РХЕ „Бајина Башта”” (<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.1>), награђеног у Студијском комитету СТК-А1 Обртне електричне машине, на 37. Саветовању CIGRE Србија, Златибор, 26-30. маја 2025.

1. УВОД

Основни циљ овог рада је приказ начина техничке реализације система побуде на агрегатима реверзибилне хидроелектране (РХЕ), као и анализа његових динамичких одзива у различитим режимима рада. Посебна пажња посвећена је структури регулационих петљи, улози лимитера и њиховој међусобној координацији, као и утицају ових елемената на стабилност рада агрегата. Анализа је заснована на резултатима испитивања и снимљеним одзивима, што омогућава увид у стварне динамичке карактеристике система побуде.

РХЕ „Бајина Башта” има значајну улогу у електроенергетском систему Србије захваљујући могућности рада у генераторском и моторном режиму, чиме се повећава флексибилност система у управљању производњом и потрошњом електричне енергије [1], [2]. Периоди мање потрошње електричне енергије користе се за пуњење горњег акумулационог језера радом електране у моторном режиму [3], [4]. Када се у систему јави потреба за додатном енергијом, агрегати прелазе на генераторски режим, при чему се потенцијална енергија воде користи за производњу електричне енергије [1], [5]. Због могућности брзог старта и промене режима рада, ово постројење може брзо да реагује на поремећаје у систему и замени друге агрегате унутар система доприносећи балансирању снаге [2], [6].

Реверзибилне електране имају значајну улогу у интеграцији обновљивих извора енергије у електроенергетски систем [7], [8]. Њихова улога огледа се у обезбеђивању производних капацитета и складиштењу енергије великих размера, што је од посебног значаја за ублажавање варијабилности снаге добијене из ветра и сунчевог зрачења [7], [9]. РХЕ „Бајина Башта”, пуштена у погон 1982. године, располаже инсталисаном снагом од 2 x 300 MW са фактором снаге 0,95 у генераторском и 2 x 310 MW у пумпном режиму [10]. Овај вид складиштења служи као резерва за националну мрежу, нарочито у периодима вршне потрошње или сушних интервала [8], [11], омогућава ефикасно управљање, ниже оперативне трошкове и доприноси стабилности мреже у условима повећане заступљености обновљивих извора [9], [12].

Управљање овим агрегатима захтева поуздан систем побуде чија је основна функција обезбеђивање магнетног флукса неопходног за рад синхроне машине. Систем побуде обезбеђује напајање побудног намотаја ротора регулисаном једносмерном струјом, чиме се контролишу напон статора и размена активне и реактивне снаге са електроенергетском мрежом [1], [13]. Такође, систем побуде пружа подршку транзијентној стабилности брзим одзивом и форсирањем побудне струје током поремећаја [1], [14].

Процес ревитализације система побуде је обухватио имплементацију техничких решења која у поређењу са ранијим системом побуде доносе недвосмислене предности у погледу поузданости, енергетске ефикасности и интеграције у погон

електране. Значајна архитектонска предност новог решења у односу на старо јесте примена потпуне 1+1 редуванције, која обухвата како управљачки тако и енергетски део система побуде. Оваква конфигурација директно подиже ниво расположивости агрегата, јер омогућава континуитет рада и аутоматски прелазак на резервне компоненте у случају унутрашњих неисправности, што код претходне погонске конфигурације није било изведено на овом нивоу. У енергетском смислу, прелазак на нову топологију успешно решава изазове повезане са расподелом струја унутар статичких претварача. Конкретно, целокупну струју побуде у свим режимима рада, укључујући и режим форсирања побуде, обезбеђује само један тиристорски мост. Овим приступом је остварена велика предност у односу на стари систем јер је у потпуности елиминисана појава несиметричног оптерећења паралелних тиристора, чиме се смањују локална термичка напрезања, уједначава деградација компоненти и продужава радни век енергетских полупроводника. Поред предности у примарним колима, нови систем побуде доноси и напредну информационо-управљачку архитектуру која представља велико унапређење у поређењу са претходним стањем. Уграђен је наменски аквизициони систем пројектован за континуални мониторинг, детекцију и анализу погонских догађаја како самог система побуде тако и целог агрегата. Кључна предност овог подсистема у односу на решења из старог система јесте његова потпуна функционална независност од рада главног регулатора побуде, чиме се осигурава да процеси обраде података ни на који начин не угрожавају стабилност примарних управљачких петљи машине. Са високом учестаношћу одабирања, од 5 kHz по каналу за аналогне величине, овај систем у поређењу са технолошким могућностима старог система омогућава знатно прецизније регистровање и верну реконструкцију брзих прелазних процеса. То олакшава каснију дијагностику кварова, идентификацију узрока поремећаја и детаљну анализу динамичког понашања система, што је са претходном аналогном или старијом дигиталном опремом било изузетно тешко или неизводљиво. Коначно, повезивање новог система побуде са SCADA системом електране изведено је кроз савремени комуникациони интерфејс који нуди супериорне могућности повезивања у односу на раније решење. Са једне стране, задржан је одређени број физичких жичаних веза за пренос контактних сигнала и команди, чиме се обезбеђује брза и галвански изолована размена временски критичних информација. С друге стране, за пренос комплексних скупова података имплементирана је серијска комуникација заснована на стандардизованом протоколу IEC 60870-5-104.

Стандардизација области система побуде обухваћена је серијама стандарда IEEE 421.1 до 6 [14]–[18] и IEC 60034-16.1 до 3 [19], који дефинишу терминологију, методе испитивања, захтеве за

перформансе, припрему техничких спецификација и моделе за анализу система.

Висока поузданост система побуде на агрегатима у Перућцу постигнута је уградњом висококвалитетне опреме уз прецизно димензионисање и доследну примену редунданције у енергетском и управљачком делу. Управљачка структура се ослања на дигиталне регулаторе који путем комплексних секвентних аутомата управљају специфичним режимима рада агрегата, укључујући синхрони старт и електрично кочење. Комплексни алгоритми управљања и регулације, уз оптималан избор параметара, омогућавају стабилан рад мотор-генератора (М-Г) у свим дозвољеним режимима, што потврђују динамички одзиви снимљени током пријемних испитивања након ревитализације [10].

Приликом пројектовања система примењене су стандардне инжењерске методе и познате структуре регулације. Као допуна стандардним регулационим функцијама, успешно је имплементиран и пуштен у рад лимитер максималне реактивне снаге, који обезбеђује сигуран рад у оквиру дозвољених дијаграма оптерећења машине. Највећи инжењерски изазов представљала је реализација комплексних секвентних стања за различите режиме рада реверзибилног постројења, при чему је у секвентни алгоритам успешно интегрисан моторни режим рада са синхроним стартом, што је приказано у 5. поглављу. Посебно је захтевна била поуздана имплементација процеса преласка са једног на друго напајање на крају процеса синхроног старта. Значајан изазов чинило је и уклапање новог система у захтеве SCADA система. С обзиром на то да се од надређеног система примају искључиво поједностављени налози (Старт, Стоп и Електрично кочење), целокупна комплексна логика секвенцијалног управљања, праћење стања и строга провера услова за безбедно извршење сваке команде морала је бити аутономно и робусно имплементирана унутар самих дигиталних регулатора побуде.

Регулатори побуде омогућавају различите режиме регулације, као што су регулација напона статора, реактивне снаге и фактора снаге. У режимима регулације реактивне снаге и фактора снаге спољашње регулационе петље задају референтну вредност унутрашњој петљи регулације напона, која обезбеђује брз одзив система [1], [14]. Подешавање PID регулатора има посебан значај и врши се применом класичних и савремених метода оптимизације [20], [21].

Поред регулационих функција, систем садржи лимитере који спречавају рад агрегата ван дозвољених граница погонског дијаграма [22]. Лимитери максималне побуде и реактивне снаге спречавају термичко преоптерећење намотаја ротора и статора, док V/Hz лимитер штити магнетно коло мотор-генератора и блок-трансформатора од презасићења [13], [23]. С друге стране, лимитер минималне побуде ограничава рад у потпобуђеној области погонског дијаграма која би могла угрозити статичку стабилност [24]. При раду овог лимитера нарочито је важно размотрити његов утицај на

електромеханичке осцилације и координацију са стабилизатором како би се избегла појава негативног пригушења [25]. Важан аспект поузданог рада је координација лимитера са заштитним уређајима. Карактеристике лимитера треба да буду прецизно подешене тако да реагују пре деловања одговарајућих заштита, чиме се спречавају непотребни испади агрегата са мреже током прелазних појава и поремећаја у систему.

Електромеханичке осцилације су природне, нискофреквентне осцилације које се јављају у међусобно повезаним електроенергетским системима због динамичке интеракције између електричних и механичких компоненти. Ове осцилације утичу на флукуације брзине обртања ротора синхроних генератора, протока електричне енергије, напона и струја. Типично имају фреквенцију од 0,1 до 3 Hz [1], [14]. Недовољно пригушење ових осцилација ограничава капацитет система за пренос енергије и способност система да се опорави од поремећаја и врати у стабилно стање. Слабопригушене осцилације у систему могу расти по амплитуди и на крају довести до каскадних испада, што у екстремним случајевима може резултирати широко распрострањеним нестанком електричне енергије. Такође, дуготрајне слабопригушене осцилације могу прекомерно оптеретити генераторе, водове и другу опрему, што може довести до убрзаног старења и повећати ризик од отказа опреме [14]. Стабилизатор електроенергетског система треба да делује на пригушење ових осцилација, а његови параметри се одређују на основу детаљне анализе стабилности при малим поремећајима [26]. Адекватно фазно компензовање унутар стабилизатора осигурава стабилност у широком опсегу радних тачака и различитих мрежних конфигурација [27].

Савремени електроенергетски системи пролазе кроз структурну транзицију обележену повећањем удела обновљивих извора енергије, првенствено ветроелектрана и фотонапонских постројења. Ова промена у производном миксу поставља комплексне захтеве пред одржавање стабилности система, нарочито у погледу пригушења системских осцилација. Карактеристика ових извора је варијабилност примарног ресурса која зависи од тренутних метеоролошких услова, што уноси стохастичност у биланс производње и потрошње електричне енергије и узрокује флукуације параметара мреже, као и повећано присуство слабопригушених електромеханичких осцилација. За разлику од конвенционалних синхроних агрегата, обновљиви извори се на мрежу повезују посредством енергетских претварача и не поседују инхерентну ротациону инерцију. Са порастом учешћа оваквих извора, укупна еквивалентна инерција електроенергетског система се смањује, што мрежу чини осетљивијом на поремећаје. У оваквим околностима, фиксна подешавања управљачких петљи претходног система побуде показују јасна

статорских извода генератора преко главног побудног трансформатора 1TE1/2TE1 (11 kV / 550 V) и прекидача 52EG при раду агрегата у генераторском режиму, односно прекидача 52EP након залетања при раду у моторном режиму. Током синхроног старта у моторном режиму и током електричног кочења, тиристорски мостови се напајају из постројења сопствене потрошње напона 0,4 kV преко трансформатора почетне побуде TIE1 (380 V / 140 V) и прекидача 52IE. Једносмерна страна тиристорских мостова повезана је на побудни намотај генератора преко прекидача FCB41 са три радна и једним мирним контактом, који уз нелинеарни отпорник омогућава брзу демагнетизацију генератора у хаваријским режимима. Поред наведеног, енергетска секција обухвата пренапонску заштиту генератора са антипаралелним тиристорима и отпорником, склоп за почетно побуђивање у генераторском режиму и RC филтере.

Основу управљачке секције чине два дигитална аутоматска регулатора побуде заснована на савременој технологији са високим перформансама регулације. Регулатори су идентични и међусобно независни, чиме је обезбеђена потпуна резерва у конфигурацији 1+1. Евентуални квар на активном регулатору узрокује аутоматски прелазак на резервни регулатор који преузима све функције без утицаја на рад агрегата. Такође, на налог оператера омогућен је прелазак са једног регулатора на други регулатор. У оквиру управљачке секције реализоване су регулационе функције, лимитери, заштите, редундантност, управљање, мерења, надзор и комуникација са другим системима и уређајима у електрани. Регулатори управљају тиристорским мостовима помоћу фазне регулације импулса за паљење тиристора, где угао паљења директно одређује вредност напона побуде. Један регулатор може управљати са оба тиристорска моста, при чему комбинација једног тиристорског моста и једног регулатора обезбеђује све предвиђене режиме рада. Локално управљање и надзор врше се помоћу 17-инчног екрана осетљивог на додир, уз даљинско управљање са SCADA система. Напајање управљачке секције је редундантно, са доводима из 220 VDC развода и инвертора електране.

Ова секција обухвата и аквизициони систем за мониторинг побуде, као и детекцију и анализу поремећаја у раду система и читавог агрегата. Аквизициони систем независно од регулатора високом учестаношћу прикупља аналогне и дигиталне сигнале. Аналогни сигнали се одабирају учестаношћу од 5 kHz, док се дигитални скенирају на сваких 10 ms. У овај систем су уведени и интерни сигнали регулатора. Систем омогућава приказ тренутних вредности и графички приказ временске промене свих величина, укључујући напоне и струје статора, напон и струју побуде, снаге, брзину агрегата, као и стања заштита и расклопне опреме. При испуњењу дефинисаних критеријума, систем аутоматски снима временске промене сигнала у фајл у одређеном трајању пре и након настанка догађаја. Такође,

аквизициони систем бележи промене дигиталних сигнала и формира хронолошку листу догађаја.

3. ОСНОВНИ ТЕХНИЧКИ ПОДАЦИ И КАРАКТЕРИСТИКЕ

Систем побуде има следеће основне техничке податке:

- тип система побуде: **статички самопобудни**;
- број регулатора побуде: **два редундантна у конфигурацији 1+1**;
- број тиристорских мостова: **два редундантна у конфигурацији 1+1**;
- тип тиристорских мостова: **трофазни пуноуправљиви**;
- хлађење тиристорских мостова: **редундантно принудно ваздушно**;
- преносни однос главног побудног трансформатора: **11 kV / 550 V**;
- преносни однос трансформатора почетне побуде: **380 V / 140 V**;
- номинална фреквенција напајања тиристорских мостова: **50 Hz**;
- номинална струја побуде: **1537 A (генератор) / 1341 A (мотор)**;
- номинални напон побуде: **330 V**;
- трајно дозвољена струја побуде: **1691 A**;
- напон побуде при трајно дозвољеној струји побуде: **363 V**;
- плафонска струја побуде: **3074 A**;
- коефицијент форсирања по струји побуде: **2**;
- дозвољено време трајања плафонске струје побуде: **10 s**;
- позитиван плафонски напон побуде при номиналном напону напајања: **670 V**;
- негативан плафонски напон побуде при номиналном напону напајања: **-520 V**;
- коефицијент форсирања по напону побуде: **2,03**;
- напонска класа тиристора: **1800 V**;
- опсег регулације напона статора: **80-110 %**;
- опсег подешења компензације пада напона по реактивном оптерећењу: **±10 %**;
- тачност регулације: **±0,5 %**;
- грешка регулације при промени температуре амбијента у опсегу 5-50 °C: **±0,5 %**;
- грешка регулације при промени фреквенције у опсегу 45 Hz-100 Hz: **±1 %**;
- време одзива побудног система: **20 ms**;
- максимално време брзог разбуђивања: **2 s**;
- максимални пораст напона статора при наглом растерећењу при номиналној активној снази и $\cos \varphi = 0,95$ уз пораст брзине до 155 %: **20 %**.

4. ФУНКЦИЈЕ СИСТЕМА ПОБУДЕ

Системи побуде пројектовани су са функционалностима описаним у наставку.

4.1 Енергетска и управљачка редунданција

- Редундантно двоканално напајање побудног намотаја мотор-генератора помоћу тиристорских мостова у конфигурацији 1+1, обезбеђујући потребну струју побуде у свим дозвољеним стационарним и прелазним режимима рада;
- редундантна двоканална регулација побуде реализована у конфигурацији 1+1;
- редундантно хлађење тиристорских мостова изведено у конфигурацији 1+1;
- аутоматски прелазак са једног на други тиристорски мост при квару активног моста или ручни прелазак на налог оператера без значајнијег утицаја на рад агрегата;
- аутоматски прелазак са једног на други регулатор при квару активног регулатора или ручни прелазак на налог оператера без значајнијег утицаја на рад агрегата;
- аутоматски прелазак са једног на други вентилатор тиристорског моста при квару активног вентилатора или ручни прелазак на налог оператера;
- прелазак са једног на други режим регулације без значајнијег утицаја на рад агрегата.

4.2 Режији регулације и управљања побудом

- Аутоматска регулација напона – регулација напона статора према задатој референтној вредности, уз компензацију пада напона на блок-трансформатору по реактивној снази М-Г;
- ручна регулација – регулација струје побуде према задатој референтној вредности;
- аутоматска регулација реактивне снаге – регулација реактивне снаге према задатој референтној вредности;
- аутоматска регулација фактора снаге – регулација фактора снаге према задатој референтној вредности;
- режим директног задавања угла паљења тиристора – могућност задавања угла паљења тиристора када је активан „тест” начин рада агрегата;
- побуђивање М-Г у аутоматској и ручној регулацији на задату вредност напона празног хода у генераторском режиму рада;
- побуђивање М-Г током синхроног старта применом статичког фреквентног претварача или током „Back-to-Back” старта у моторном режиму рада.

4.3 Лимитери и заштите

- Аутоматско ограничење рада М-Г у области дозвољених термичких напрезања статора и ротора, а у складу са погонском картом М-Г; ово је реализовано преко лимитера минималне побуде, лимитера максималне струје ротора, лимитера максималне струје статора и лимитера максималне реактивне снаге;
- временски ограничено форсирање побуде применом комбиноване тренутне и инверзне

струјно-временске карактеристике, активно при великим поремећајима у електроенергетском систему;

- спречавање магнетског преоптерећења М-Г и блок-трансформатора, реализовано преко V/Hz лимитера;
- пригушење електромеханичких осцилација ротора, реализовано преко стабилизатора електроенергетског система типа PSS2B.

4.4 Поступци заустављања и хаваријско искључење

- Разбуђивање М-Г инвертовањем тиристора при нормалном заустављању;
- гашење поља М-Г у хаваријским режимима помоћу прекидача и отпорника за демагнетизацију;
- електрично кочење применљиво при заустављању агрегата;
- заштита од појаве пренапона у побудном колу, који могу настати услед асинхроног рада М-Г на мрежи или при прекиду струјног кола побуде.

4.5 Систем интерних заштита система побуде

- Заштита од отказа регулационог канала;
- краткоспојна заштита на једносмерној страни система побуде;
- земљоспојна заштита побудног кола;
- прекострујна заштита трансформатора;
- краткоспојна заштита трансформатора;
- диференцијална заштита трансформатора;
- заштита од преоптерећења ротора са струјно зависном временском карактеристиком;
- заштита од фазне несиметрије тиристорског моста;
- заштита од нестанка сигнала синхронизације паљења тиристора;
- заштита од нестанка мерења статорског напона;
- заштита од нестанка мерења струја побуде;
- заштита од неуспелог побуђивања;
- заштита од неуспелог разбуђивања;
- самонадзор управљачке електронике.

4.6 Аквизиција података, надзор и комуникација

- Формирање хронолошке листе догађаја;
- снимање у фајлове сигнала са резолуцијом до 5 kHz; снимање се покреће при испуњењу услова за тригер, обухватајући дефинисано трајање пре и након настанка тригера, као и на директан налог оператера;
- локално управљање и надзор остварени путем екрана дијагонале 17" осетљивог на додир, као и са предњих панела регулатора опремљених дисплејем, LED диодама и тастерима;
- даљинска комуникација са другим уређајима и системима у електрани, укључујући управљање и надзор посредством SCADA система.

5. РЕЖИМИ РАДА АГРЕГАТА И СЕКВЕНТНА СТАЊА РЕГУЛАТОРА

Рад регулатора побуде организован је кроз секвентна стања која представљају делове програмског кода који постају активни у зависности од режима рада М-Г, налога оператера, сигнала из система за надзор и управљање, деловања заштита и осталих системских услова. Сваки технолошки режим поседује специфичну структуру стања приказану на одговарајућим дијаграмима.

5.1 Генераторски режим

Процес рада система побуде када је агрегат у генераторском режиму обухвата неколико секвентних стања описаних у наставку:

- **почетна фаза и припрема:** у почетном стању импулси за тиристорске мостове су блокирани; након залетања агрегата до номиналне брзине задавањем налога за старт уколико су испуњени сви услови врши се припрема укључењем прекидача 52EG и прекидача поља FCB41;
- **побуђивање и празан ход:** када се испуне услови за побуђивање, деблокирају се импулси; будући да главни побудни трансформатор 1TE1/2TE1 при разбуђеном стању М-Г није под напоном, поступак побуђивања почиње укључењем склопа почетне побуде; током постепеног пораста напона статора, напајање система преузима мотор-генератор, а регулатор одржава напон у режиму аутоматске регулације;
- **рад на мрежи:** након синхронизације и повезивања на мрежу, омогућен је избор између аутоматске регулације напона статора, регулације реактивне снаге или фактора снаге;
- **разбуђивање и искључење:** по налогу за заустављање или деловању заштите се врши инвертовање тиристорског моста ради брзог разбуђивања; процес се завршава искључењем прекидача 52EG и FCB41.

5.2 Синхрони старт

Током процеса синхроног старта М-Г агрегат се залеће од мировања до номиналне брзине. Статор М-Г се напаја са стартног агрегата у ХЕ током „Back-to-Back” синхроног старта, односно са фреквентног претварача у процесу SFP синхроног старта, док се ротор напаја константном струјом побуде. Процес рада система побуде током синхроног старта обухвата секвентна стања описана како следи:

- **припрема и почетак залетања:** из почетног стања у ком су блокирани импулси, задавањем налога за старт уколико су испуњени сви услови за синхрони старт, прелази се у стање припреме; у овом стању се укључују прекидач 52IE и прекидач поља FCB41, чиме се успоставља напајање из развода сопствене потрошње електране преко трансформатора TIE1;
- **побуђивање:** када се испуне услови за побуђивање, деблокирају се импулси, агрегат се побуђује и регулатор одржава константну струју

побуде током целог процеса залетања; у овом стању активна је заштита од неуспелог синхроног старта;

- **успешан старт и прелазак:** када се детектују успешан синхрони старт и залетање, врши се укључење тиристора за прелаз који преспаја ротор и омогућава безбедну промену напајања система побуде; искључењем прекидача 52IE и укључењем прекидача 52EP прелази се на напајање система побуде са извода генератора у моторном режиму рада;
- **разбуђивање при прекиду залетања:** ако дође до неуспелог залетања или налога за прекид, улази се у стање у коме се врши инвертовање моста или брзо разбуђивање; процес се завршава искључењем прекидача 52IE и FCB41.

5.3 Моторни режим

Након успешног синхроног старта, агрегат прелази у моторни режим који обухвата фазе описане у наставку:

- **успостављање самопобуде:** агрегат је на номиналној брзини у празном ходу, побуђен је са статорских извода, при чему је активна аутоматска регулација напона;
- **рад мотора на мрежи:** након синхронизације са мрежом у моторном режиму, прелази се у стање у ком су уз аутоматску регулацију напона статора и ручну регулацију омогућене и аутоматска регулација реактивне снаге и аутоматска регулација фактора снаге;
- **искључење из моторног режима:** по налогу за разбуђивање у моторном режиму, врши се инвертовање тиристорског моста или брзо разбуђивање; процес се финализује искључењем прекидача 52EP и FCB41.

5.4 Електрично кочење

Са циљем ефикаснијег и временски краћег заустављања, као и смањеног интензитета хабања механичких кочница, агрегати РХЕ „Бајина Башта” заустављају се процесом електричног кочења. На тај начин се продужава век трајања механичких кочница, олакшава њихово одржавање и избегава загађење услед дисипације материјала контактних облога механичких кочница у генераторском простору. Током електричног кочења ротор се напаја константном струјом побуде, док је намотај статора у трополном кратком споју који се формира укључењем растављача за електрично кочење када брзина агрегата падне испод 50% номиналне вредности. Након побуђивања агрегата струје, у намотајима статора стварају кочиони момент који зауставља агрегат без употребе механичких кочница.

- **припрема за кочење:** секвенца се активира када је агрегат у празном ходу и када брзина ротора падне испод 50% номиналне вредности; у овом стању се врши затварање растављача за електрично кочење, чиме се намотај статора доводи у трополни кратки спој, укључују се прекидач 52IE и прекидач поља FCB41, чиме се успоставља напајање из развода

сопствене потрошње електране преко трансформатора Т1Е1;

- **побуђивање:** када се испуне услови за побуђивање, деблокирају се импулси, агрегат се побуђује и регулатор одржава константну струју побуде током целог процеса кочења. У овом стању су активне заштите специфичне за електрично кочење;
- **завршетак кочења и разбуђивање:** када агрегат достигне стање мировања или врло малу брзину, регулатор прелази у фазу инвертовања тиристорског моста ради брзог разбуђивања; по завршетку разбуђивања, искључују се прекидач 52IE и прекидач поља FCB41, чиме се систем враћа у почетно стање.

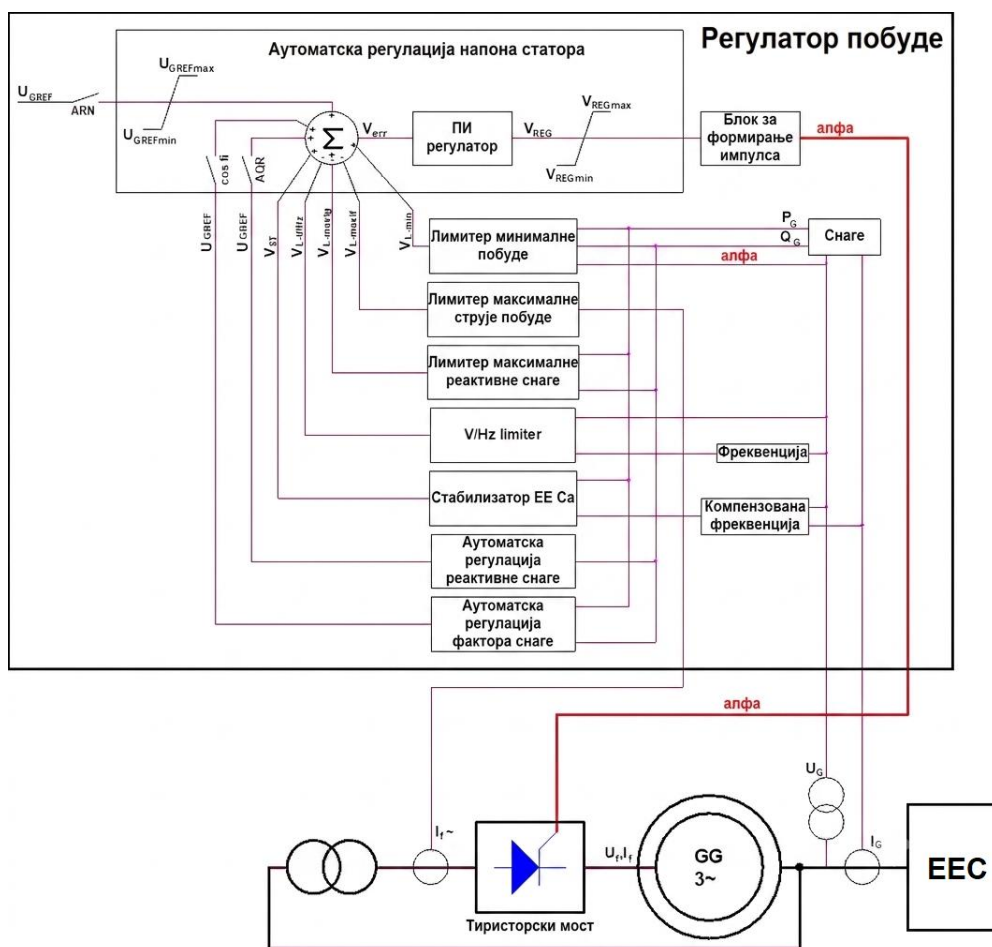
6. РЕГУЛАЦИЈА ПОБУДЕ

6.1 Аутоматска регулација напона статора

Аутоматска регулација напона представља основни режим регулатора побуде у ком се напон статора одржава на референтној вредности. Структурна шема система за регулацију побуде када је активна аутоматска регулација је приказана на Слици 2. Аутоматска регулација је заснована на ПИ

регулатору (пропорционално и интегрално дејство) и има негативну повратну спрегу по напону статора. У циљу компензовања пада напона на блок-трансформатору у регулацију је уведен статизам по реактивној снази. Позитивна вредност статизма узрокује благи пораст напона генератора са порастом генерисане реактивне снаге, чиме се обезбеђује равномерна расподела реактивне снаге између агрегата. Лимитери побуде који имају за циљ да спрече да се генератор нађе ван дозвољене области рада погонског дијаграма (слике 3 и 4) делују преко суматора аутоматске регулације, као и стабилизатор електроенергетског система који делује на пригушење електромеханичких осцилација агрегата. Коначни излазни сигнал АРН петље директно одређује угао фазног помераја α за паљење тиристора, чиме се прецизно контролише излазни напон тиристорског моста (напон побуде).

Овај режим регулације се аутоматски блокира када је активна заштита од нестанка мерења напона статора и током електричног кочења. Важно је напоменути да је АРН петља активна и у режимима регулације реактивне снаге АQR и регулације фактора снаге $\cos \phi$. У тим случајевима, ови режими делују као надређене регулације које аутоматски мењају референтну вредност АРН регулатора како би постигле референтну вредност реактивне снаге или

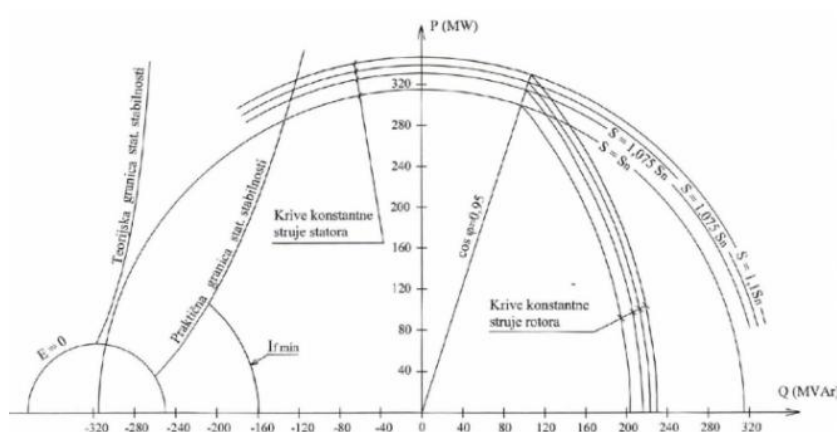


Слика 2. Структурна шема система за регулацију побуде када је активна аутоматска регулација

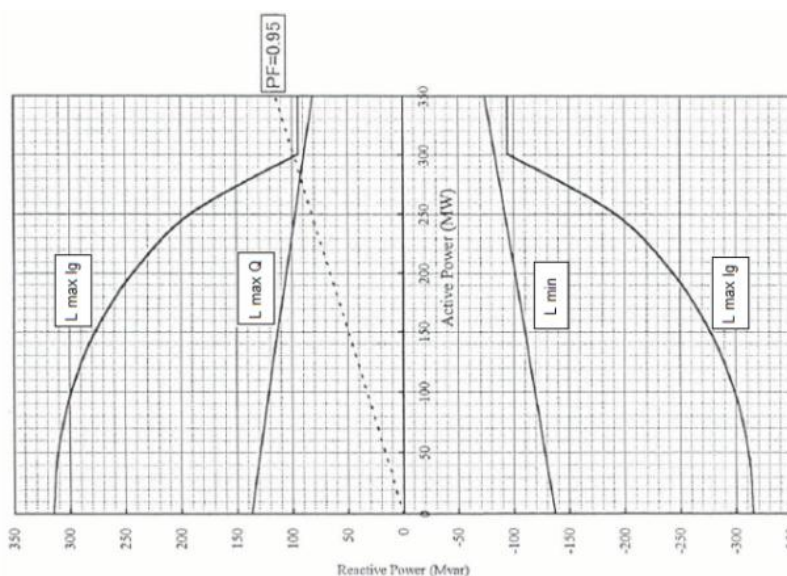
фактора снаге задату од стране оператора у опсегу дефинисаном погонским дијаграмом.

Када је активна ручна регулација, сигнал референце стално прати рад ручне регулације, чиме се

обезбеђује прелаз са ручне на аутоматску регулацију без промене у струји побуде и напону генератора.



Слика 3. Погонски дијаграм агрегата



Слика 4. Лимитери побуде

6.2 Ручна регулација струје побуде

Ручна регулација струје побуде представља резервни режим рада регулатора побуде при којем се струја побуде одржава на референтној вредности. Структурна шема система за регулацију побуде када је активна ручна регулација приказана је на Слици 5.

Ручна регулација је заснована на ПИ регулатору (пропорционално и интегрално дејство) и има негативну повратну спрегу по струји побуде. Лимитери побуде који имају за циљ да спрече да се генератор нађе ван дозвољене области рада погонског дијаграма делују преко суматора ручне регулације. Коначни излазни сигнал РР петље директно одређује угао фазног помераја α за паљење тиристора, чиме се прецизно контролише излазни напон тиристорског моста (напон побуде).

Заштита од нестанка мерења струје побуде блокира овај режим регулације. Из аутоматске регулације у ручну регулацију се прелази аутоматски при нестанку мерења напона статора, као и током електричног кочења и синхроног старта. Када је активна аутоматска регулација, сигнал референце резервне регулације прати рад аутоматске регулације, чиме се обезбеђује прелаз на ручну регулацију у сваком тренутку без значајније промене у струји побуде.

6.3 Аутоматска регулација реактивне снаге (AQR)

Аутоматска регулација реактивне снаге (AQR) представља режим у ком се реактивна снага одржава на референтној вредности. Блок-шема AQR регулације дата је на Слици 6. Регулација реактивне снаге је заснована на ПИ регулатору и има негативну повратну спрегу по реактивној снази. Излазни сигнал

6.5 Блок за формирање импулса за паљење тиристора

Блок за формирање импулса за паљење тиристора на основу излазног сигнала регулације и сигнала синхронизације на свом излазу формира импулсе за паљење тиристора тиристорског моста који је у раду. Сигнал синхронизације представља напон на наизменичној страни тиристорских мостова.

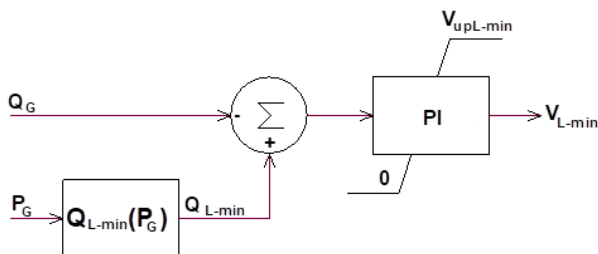
Применом функције $\arccos$ на излазни сигнал регулације добија се угао паљења тиристора α , који одређује фазни померај импулса у односу на напон напајања тиристорских мостова. Применом ове функције напон на излазу тиристорског моста постаје пропорционалан излазном сигналу регулације, чиме је линеаризована косинусна преносна функција тиристорског моста.

6.6 Лимитер минималне побуде

Лимитер минималне побуде делује на повећање побудне струје. Деловање лимитера минималне побуде има за циљ:

- спречавање радних режима који могу угрозити стабилност синхроне машине или могу довести до губитка синхронизма услед недовољне побуде;
- спречавање радних режима са екстремно ниском побудом који могу довести до прегревања чеоних пакета лимова статора;
- спречавање одраде заштите од губитка побуде у потпобуђеним режимима рада.

Блок-дијаграм лимитера минималне побуде је приказан на Слици 8.



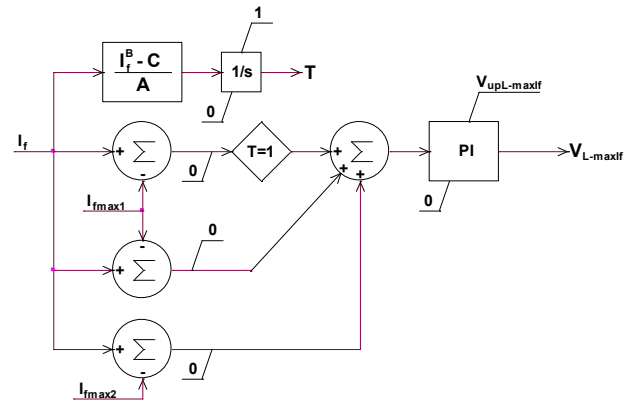
Слика 8. Блок-дијаграм лимитера минималне побуде

Лимитер је заснован на ПИ регулатору. Улазни сигнали лимитера минималне побуде су мерења активне и реактивне снаге. Реактивна снага при којој лимитер прорађује зависи од вредности активне снаге и напона статора и формира се на основу границе прораде лимитера $Q_{L-min}(P_G)$ (Слика 4). Излазни сигнал лимитера минималне побуде делује преко суматора аутоматске или ручне регулације и учествује у формирању сигнала грешке.

6.7 Лимитер максималне струје побуде

Функција лимитера максималне струје побуде је да одржи струју ротора у границама дозвољеног оптерећења, како би се спречило прегревање ротора услед превелике струје побуде и одрада прекострујне заштите ротора. Истовремено лимитер треба да омогући временски ограничено форсирање побуде у

циљу побољшања стабилности система. При појави преоптерећења лимитер најпре детектује преоптерећење, дозвољава трајање преоптерећења током дефинисаног временског периода и уколико преоптерећење постоји и након тог периода, лимитер делује на смањење побудне струје на границу прораде лимитера. Лимитер има две вредности прораде и комбиновану тренутну и инверзну временску карактеристику. Блок-шема лимитера је приказана на Слици 9.



Слика 9. Блок-дијаграм лимитера максималне струје побуде

Улазни сигнал лимитера максималне струје побуде је мерење струје побуде. Лимитер је заснован на ПИ регулатору. Прва вредност прораде I_{fmax1} представља трајно дозвољену струју побуде, док друга вредност прораде I_{fmax2} представља плафонску струју побуде. За побудну струју чија је вредност између I_{fmax1} и I_{fmax2} одрада лимитера има инверзну временску карактеристику која се подешава параметрима A , B и C , док за побудну струју чија је вредност већа од I_{fmax2} лимитер одрађује тренутно. Излазни сигнал лимитера делује преко суматора аутоматске или ручне регулације и учествује у формирању сигнала грешке. Дозвољено време трајања преоптерећења ротора у зависности од струје побуде је у стандарду [18] дефинисано функцијом:

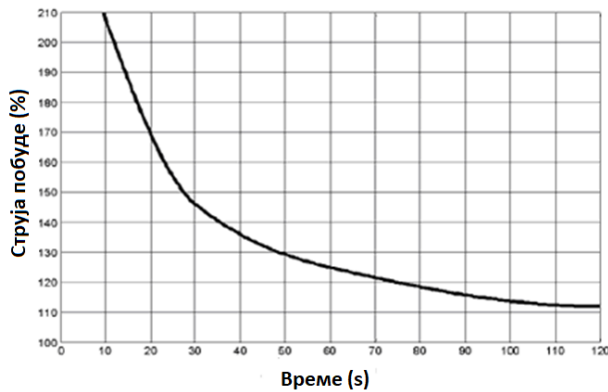
$$time = A / (I_f^B - C) \quad (1)$$

при чему су: I_f – струја побуде у релативним јединицама (енгл. *per unit*, р. u.); A , B и C – коефицијенти. Најчешће се дозвољено преоптерећење ротора моделује квадратном функцијом ($B = 2$). Пример ове карактеристике је приказан на графику на Слици 10.

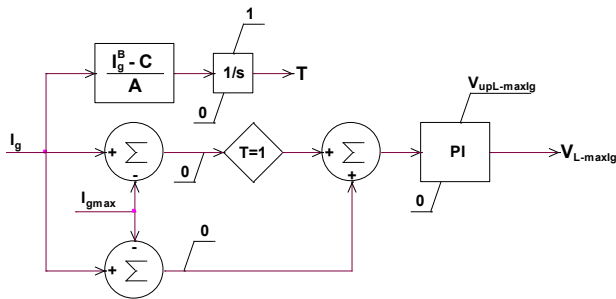
6.8 Лимитер максималне струје статора

Функција лимитера максималне струје статора је да одржи струју статора у границама дозвољеног оптерећења, како би се спречила одрада прекострујне заштите генератора. При појави преоптерећења лимитер најпре детектује преоптерећење, дозвољава трајање преоптерећења током дефинисаног временског периода и уколико преоптерећење постоји и након тог периода, лимитер делује на смањење

струје на границу прораде лимитера. Лимитер има инверзну временску карактеристику прораде. Блок-шема лимитера је приказана на Слици 11.



Слика 10. Карактеристика дозвољеног преоптерећења ротора



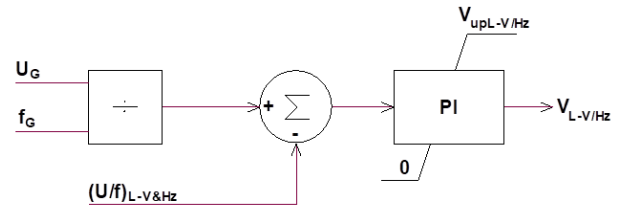
Слика 11. Блок-дијаграм лимитера максималне струје статора

Улазни сигнал лимитера максималне струје статора је сигнал I_g пропорционалан струји статора генератора. Лимитер је заснован на ПИ регулатору. Вредност прораде I_{gmax} представља трајно дозвољену струју статора. Одрада лимитера има инверзну временску карактеристику. Излазни сигнал лимитера делује преко суматора аутоматске или ручне регулације и учествује у формирању сигнала грешке.

Дозвољено време трајања преоптерећења статора у зависности од струје статора може се исказати сличном функцијом као и код ротора (Слика 10).

6.9 Лимитер V/Hz

Лимитер V/Hz служи да заштити генератор и блок-трансформатор од прекомерног магнетног флукса при ниској фреквенцији или превеликом напону. Прекомеран флукс доводи до прегревања и може изазвати оштећење гвозденог језгра блок-трансформатора и генератора. Лимитер V/Hz убичајено се користи за заштиту генератора или блок-трансформатора када је брзина генератора, а самим тим и фреквенција, снижена при побуђеној машини, на пример при старту или заустављању агрегата. Блок-шема лимитера је приказана на Слици 12.



Слика 12. Блок-дијаграм лимитера V/Hz

Однос напона и фреквенције у релативним јединицама, назначен као однос V/Hz, мерљива је величина пропорционална магнетном флуксу, због чега се као улазни сигнали користе мерења напона статора и фреквенције. Однос $(U/f)_{L-V/Hz}$ представља однос напона и фреквенције при ком лимитер прорађује. Лимитер делује преко суматора аутоматске или ручне регулације и учествује у формирању сигнала грешке.

6.10 Стабилизатор електроенергетског система

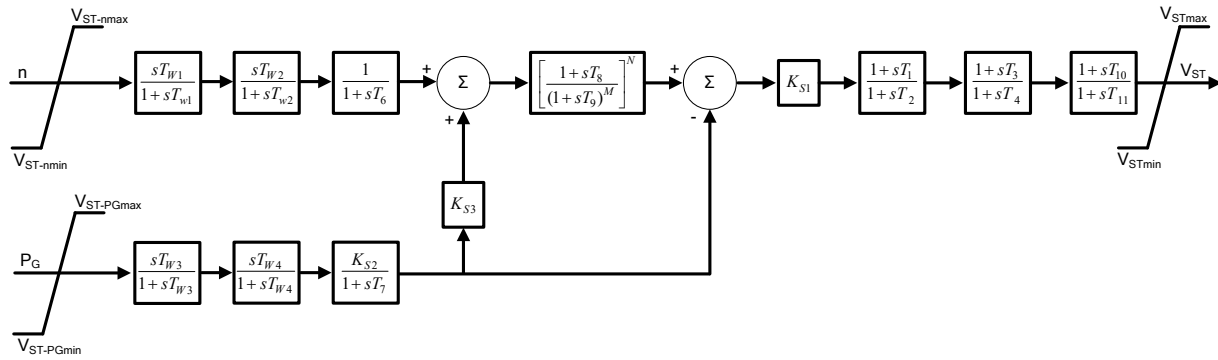
Електромеханичке осцилације у електроенергетском систему представљају појаву међусобног осциловања ротора синхроних машина једних у односу на друге користећи преносне водове за размену енергије и приметне су у карактеристичним варијаблама стања синхроне машине: брзини ротора, фреквенцији, активној и реактивној снази, напону, струји, углу снаге итд. Основна функција стабилизатора електроенергетског система је пригушење електромеханичких осцилација генерисањем позитивног пригушног момента на вратилу који је у фази са варијацијама брзине. То се постиже деловањем на побудни флукс преко додатног улаза у аутоматску регулацију напона статора. Стабилизатор треба да делује само на осцилације које су у опсегу учестаности од интереса (типично од 0,2 до 2,5 Hz).

Стабилизатор делује распирујуће на торзионе осцилације агрегата које представљају осцилације између ротационих елемената агрегата: ротори турбинских секција, ротор генератора и ротори будилица (уколико постоје) и учестаности су изнад 2,5 Hz. Због тога у оквиру стабилизатора мора бити примењен торзиони филтер пропусник ниских учестаности који спречава деловање стабилизатора на овај тип електромеханичких осцилација [15].

Блок-дијаграм стабилизатора електроенергетског система је приказан на Слици 13 [18]. Принцип рада стабилизатора се може описати полазећи од једначине кретања ротора:

$$\Delta\omega = \frac{1}{2H} \int (\Delta P_m - \Delta P_e) dt = \frac{1}{2H} \int \Delta P_a dt \quad (2)$$

где су: $\Delta\omega$ – промена кружне учестаности, H – константа инерције агрегата, ΔP_m – промена механичке снаге, ΔP_e – промена електричне снаге и ΔP_a – промена снаге убрзања. Механичка снага се не мери директно, већ се интеграл њене промене рачуна преко електричне снаге и брзине на основу једначине:



Слика 13. Блок-дијаграм стабилизатора електроенергетског система

$$\int \Delta P_m dt = 2H \cdot \Delta \omega + \int \Delta P_e dt \quad (3)$$

Главна предност овог стабилизатора је што нема потребе за торзионим филтером у главном делу стабилизатора (појачање стабилизатора и ускладници за фазну компензацију), тако да торзиони филтер не утиче на сигнал ΔP_e . С обзиром на то да интеграл промене механичке снаге садржи у себи и торзионе осцилације и с обзиром на то да су промене механичке снаге веома споре, филтер пропусник ниских учестаности се може применити на овај сигнал у циљу пригушења торзионих учестаности.

Еквивалентна брзина која се користи као стабилизациони сигнал и на коју треба применити фазну компензацију добија се као интеграл снаге убрзања и не садржи торзионе осцилације:

$$\omega_e = \int \frac{\Delta P_a}{2H} dt = -\frac{\Delta P_e(s)}{2Hs} + G(s) \left[\frac{\Delta P_e(s)}{2Hs} + \Delta \omega \right] \quad (4)$$

Улазни сигнали стабилизатора су мерење електричне активне снаге P_G и мерење брзине агрегата n . За мерење брзине се користи филтрирано ПЛЛ мерење компензоване фреквенције која је приближна брзини агрегата. Компензована фреквенција се добија рачунањем фреквенције сигнала електромоторне силе

$$\underline{E} = \underline{U}_G + jX_q \underline{I}_G \quad (5)$$

где је X_q синхрона реактанса генератора у q-оси.

Стабилизатор најпре елиминира једносмерне компоненте улазних сигнала помоћу филтера једносмерне компоненте (*washout filter*) са временским константама T_{w1} , T_{w2} , T_{w3} и T_{w4} . Ови филтери искључују деловање стабилизатора у устаљеном стању и при промени механичке снаге турбине. Параметри T_6 и T_7 представљају временске константе мерних претварача. За добијање интеграла механичке снаге параметар K_{S3} треба да има вредност 1, а параметар K_{S2} вредност $T_7/2H$. Параметри T_8 и T_9 представљају параметре торзионог филтера пропусника ниских учестаности (*ramp-tracking filter*) који треба да спречи деловање стабилизатора на торзионе осцилације. Параметри T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_{10} и T_{11} представљају параметре диференцијалних и интегралних ускладника (*lead-lag compensator*) помоћу којих се врши фазна компензација фреквентне

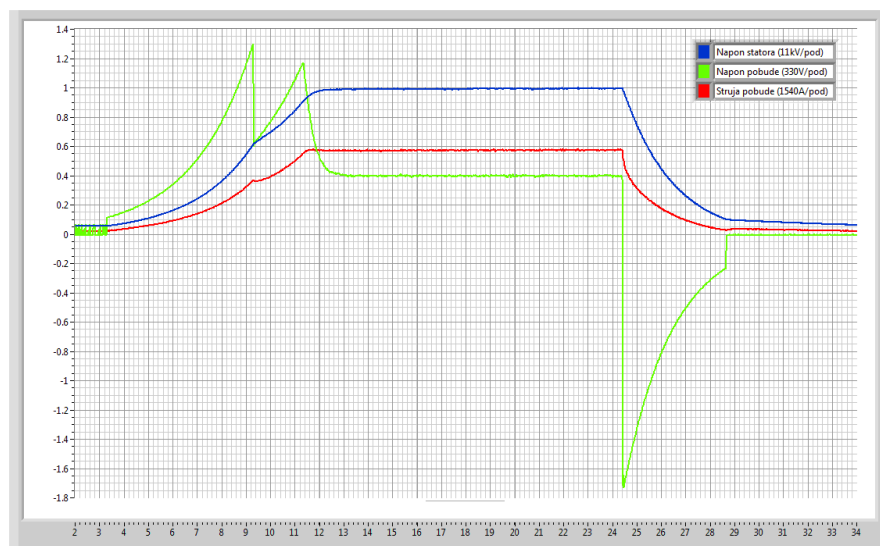
карактеристике регулације побуде како би стабилизатор генерисао позитиван пригушни момент, који је у фази са варијацијама брзине, у опсегу учестаности од интереса. Појачање стабилизатора од кога зависи фактор пригушења електромеханичких осцилација је одређено параметром K_{S1} . При подешавању вредности појачања треба подесити на трећину вредности појачања при ком долази до нестабилности регулације побуде.

7. ДИНАМИЧКИ ОДЗИВИ

У оквиру пријемних испитивања агрегата, спроведена је опсежна анализа рада система за регулацију побуде. У наставку су приказани динамички одзиви снимљени током ових тестирања, који су послужили као основа за детаљну евалуацију и верификацију показатеља динамичких перформанси система. Испитивања су обухватила следеће радне режиме и транзијентне појаве:

- побуђивање и разбуђивање (Слика 14);
- одзив на одскочну промену референце аутоматске регулације напона (Слика 15);
- електрично кочење (Слика 16);
- синхрони старт (Слика 17);
- одзив на одскочну промену референце аутоматске регулације напона на мрежи са укљученим стабилизатором (Слика 18);
- одзив на одскочну промену референце регулације реактивне снаге (Слика 19);
- активација и одзиви лимитера (Слика 20);
- збацивање снаге агрегата (Слика 21).

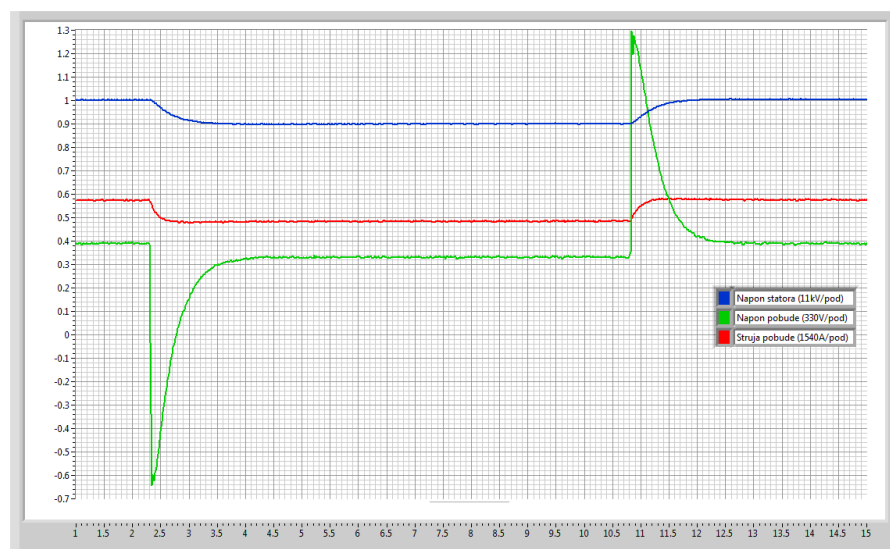
Детаљном анализом експерименталних резултата потврђено је да се показатељи квалитета динамичких одзива налазе унутар граница прописаних међународним стандардима и пројектним захтевима, уз напомену да су одзиви на мрежи спорији у односу на празан ход услед знатно мањег појачања еквивалентне преносне функције мотор-генератора и мреже због реакције индукта. Прихватљиви опсези показатеља одзива на одскочне промене референце аутоматске регулације напона (АРН) дефинисани су стандардом [15], док су за остале одзиве наведене искуствене вредности из погонске праксе. Параметри регулатора су подешени тако да одзиви буду довољно брзи уз ефикасну компензацију флукуација у систему, а да се при томе ни на који начин не угрози стабилност рада.



Слика 14. Побуђивање и разбуђивање у аутоматској регулацији напона

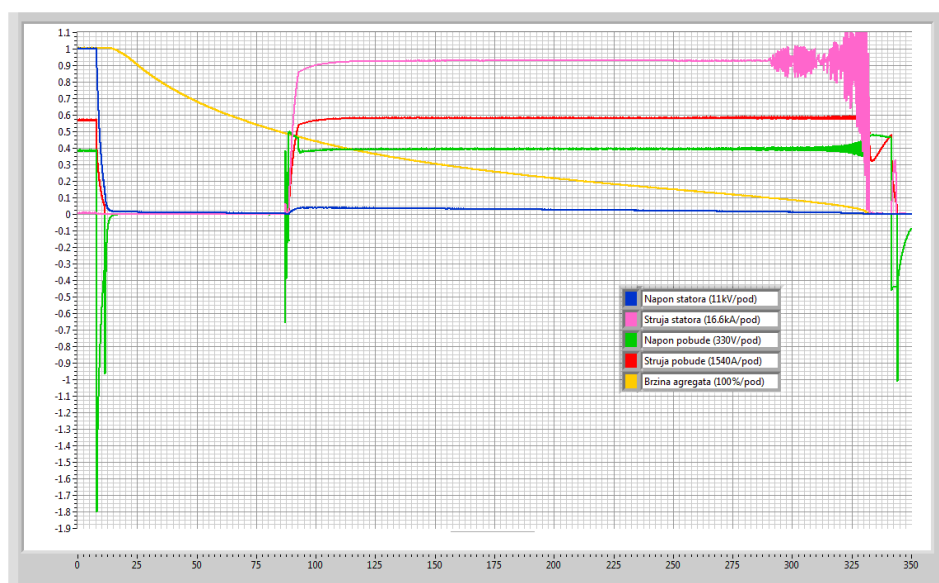
Табела I Показатељи динамичког одзива аутоматске регулације напона при побуђивању и разбуђивању

Назив	Измерено	Прихватљив опсег
Време одзива при побуђивању (s)	6,39	5–10
Време смирења при побуђивању (s)	8,48	8–15
Прескок при побуђивању (%)	0	0–15
Време одзива при разбуђивању (s)	3,91	2–10
Време смирења при разбуђивању (s)	8,38	5–15

Слика 15. Одзив на одскочну промену референце од $\pm 10\%$ у празном ходу – аутоматска регулација

Табела II Показатељи динамичког одзива аутоматске регулације напона на одскочну промену референце

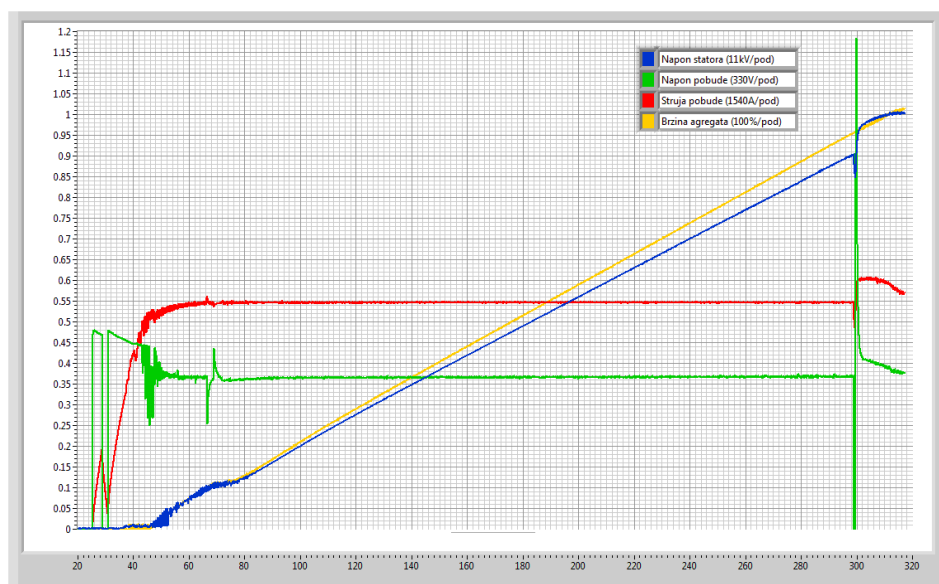
Назив	Измерено	Прихватљив опсег
Време одзива (s)	0,62	0,025–2,5
Време смирења (s)	0,92	0,2–10
Прескок (%)	0	0–15



Слика 16. Електрично кочење агрегата

Табела III Показатељи електричног кочења агрегата

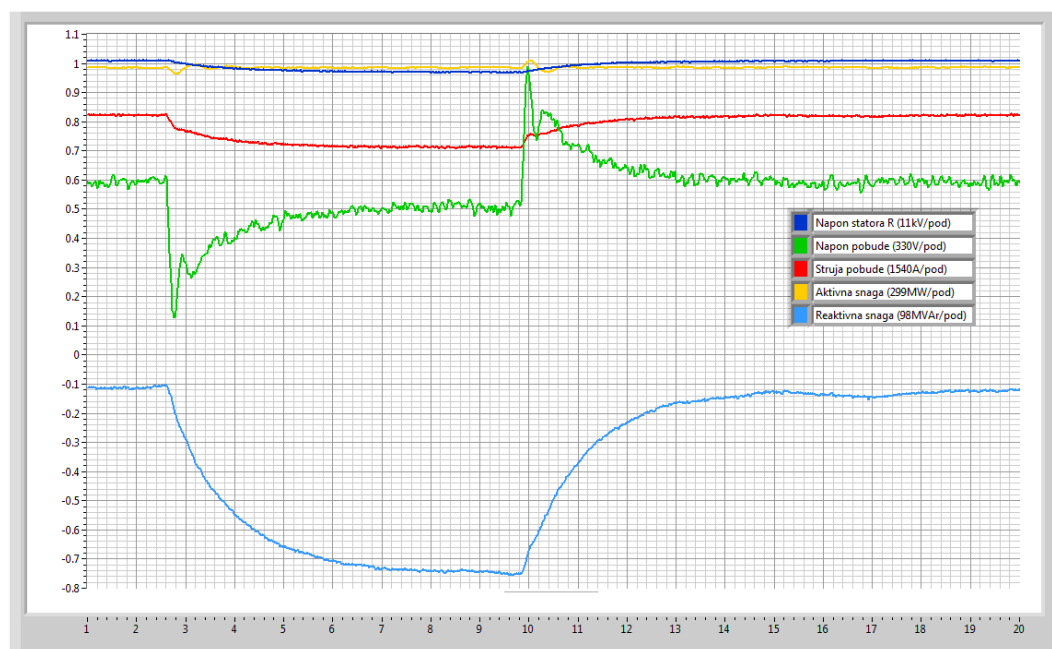
Брзина агрегата на којој стартује електрично кочење (р. и.)	0,50
Струја статора у процесу електричног кочења (р. и. / kA)	0,93/15,44
Струја побуде у процесу електричног кочења (р. и. / A)	0,59/908
Брзина агрегата при којој се искључује електрично кочење (р. и. / A)	≈ 0
Време трајања електричног кочења (s)	249



Слика 17. Синхрони старт агрегата са SFP-ом

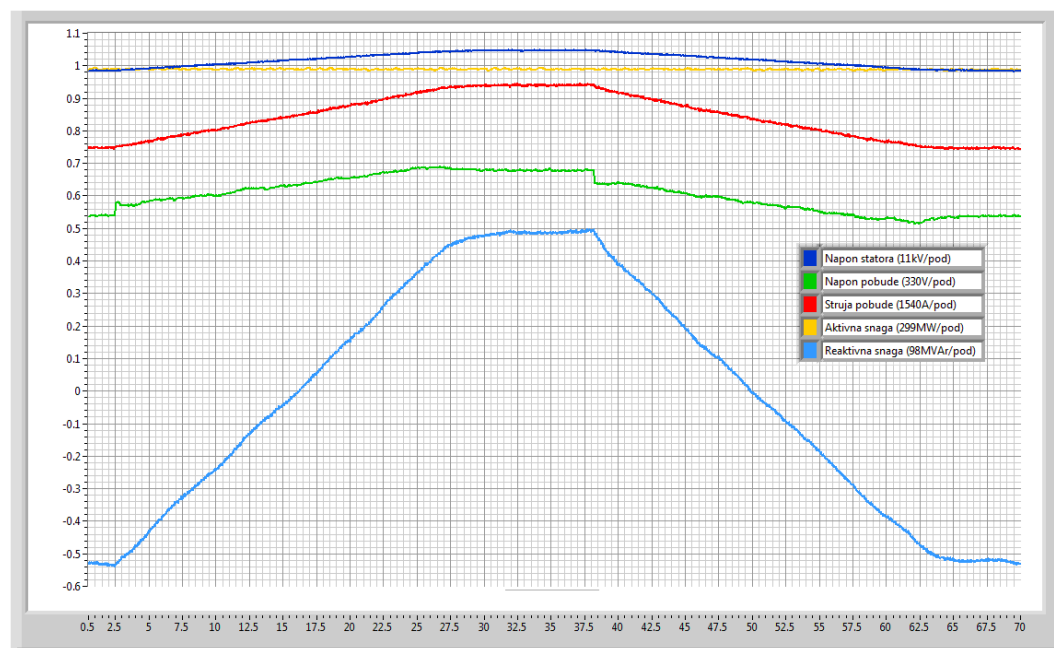
Табела IV Поређење показатеља два начина синхроног старта агрегата

	SFP	Back-to-Back
Струја побуде у процесу синхроног старта (р. и. / A)	0,55 / 840	0,55/840
Вредност брзине за активирање сигнала <i>Синхрони старт успешан</i> (р. и.)	0,9	0,9
Вредност напона статора за активирање сигнала <i>Синхрони старт успешан</i> (р. и.)	0,9	0,9
Време трајања синхроног старта (s)	295	210

Слика 18. Одзив на одскочну промену референце АРН-а од $\pm 4\%$ са укљученим стабилизатором

Табела V Поређење показатеља динамичког одзива са укљученим и искљученим стабилизатором

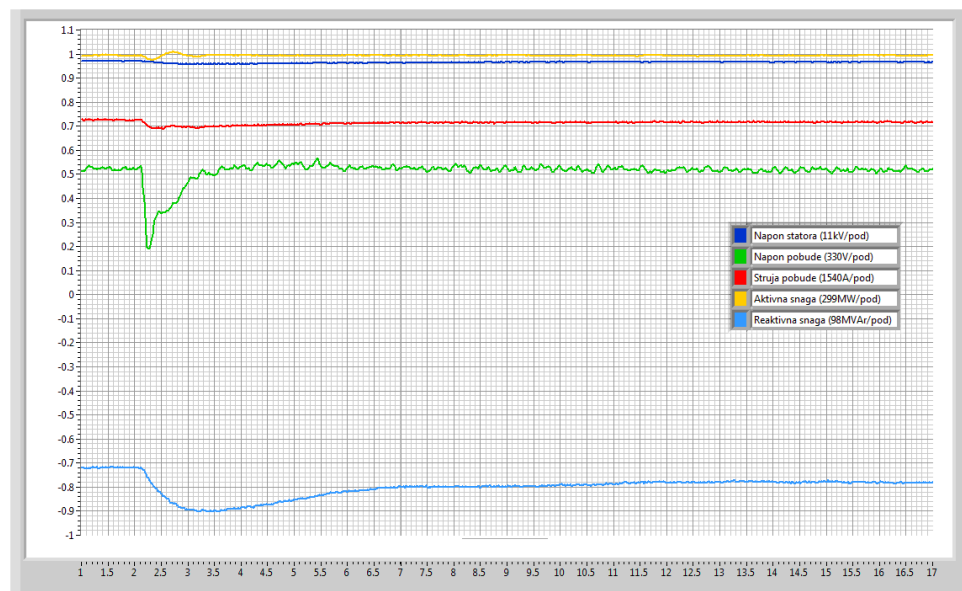
Назив	Стаб. искљ.	Стаб. укљ.	Прихватљив опсег
Време одзива (s)	1,84	1,85	0,025–2,5
Време смирења (s)	2,76	2,78	0,2–10
Прескок (%)	0	0	0–15
Фактор пригушења електромеханичких осцилација (%)	10,9	29,4	5–100



Слика 19. Одзив на одскочну промену референце АQP-а

Табела VI Показатељи динамичког одзива аутоматске регулације реактивне снаге на одскочну промену референце

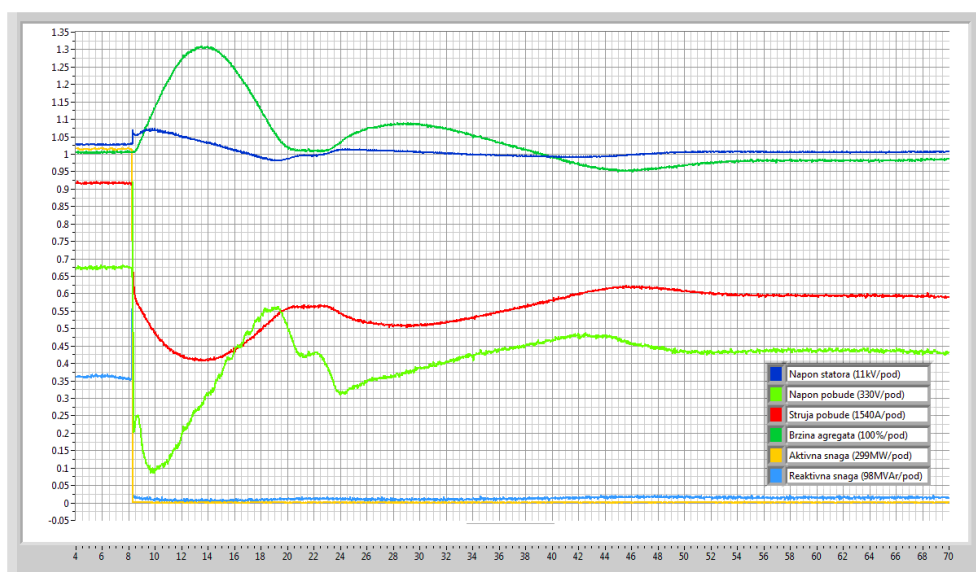
Назив	Вредност	Прихватљив опсег
Време одзива (s)	21	10–50
Време смирења (s)	27	12–100
Прескок (%)	0	0–15



Слика 20. Одзив лимитера минималне побуде на одскочну промену референце АРН-а од -3% са укљученим стабилизатором

Табела VII Показатељи динамичког одзива лимитера минималне побуде

Назив	Стаб. искљ.	Стаб. укљ.	Прихватљив опсег
Време одзива (s)	3,75	3,71	2–6
Време смирења (s)	4,41	4,34	2,5–10
Прескок (%)	0	0	0–15
Фактор пригушења електромеханичких осцилација (%)	9,7	23,1	5–100



Слика 21. Одзив при збацивању 100% номиналне снаге

Табела VII Пораста напона статора при збацивању снаге

Назив	75% P _n	100% P _n	Прихватљива вредност
Максимална вредност напона статора (p. j.)	1,05	1,07	1,15

8. ЗАКЉУЧАК

Ревитализација агрегата представља кључан инжењерски подухват за продужење животног века ове реверзибилне хидроелектране наредних неколико деценија. Замена комплетног система побуде омогућава висок ниво флексибилности у управљању производњом и потрошњом енергије, брзо реаговање на поремећаје у мрежи и сигурну подршку за интеграцију варијабилних обновљивих извора енергије у електроенергетски систем Србије.

Уградњом квалитетне опреме уз правилно димензионисање и примену редуванције и у енергетском и у управљачком делу система постигнута је висока поузданост система побуде. Комплексни алгоритми управљања и регулације уз оптималан избор параметара омогућавају стабилан рад мотор-генератора у свим дозвољеним стационарним и прелазним режимима рада, што показују експериментално добијени динамички одзиви система побуде снимљени током пријемних испитивања агрегата. Нова топологија успешно решава проблем несиметричног оптерећења полупроводника јер целокупну струју побуде у свим режимима покрива само један тиристорски мост, чиме се смањују локална термичка напрезања и продужава радни век опреме.

Унутар регулатора су успешно и робусно имплементирани комплексни алгоритми који омогућавају комплетну контролу и стабилан рад мотор-генератора у сва четири квадранта погонског дијаграма. Сигурност у раду унутар дозвољених термичких граница гарантована је координисаним деловањем лимитера који реагују пре заштитних уређаја и спречавају непотребне испаде агрегата са мреже. Имплементација стабилизатора електроенергетског система типа PSS2B, који је заснован на интегралу снаге убрзања и опремљен торзионим филтером, омогућава ефикасно пригушење нискофреквентних електроинергијских осцилација у опсегу од 0,2 до 2,5 Hz.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [2] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2008.
- [3] C.-J. Yang, X. Zhang, and H. Li, „Pumped Storage Hydropower: A Review,” *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 46, pp. 409–432, 2021.
- [4] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, and M. M. Alam, „Pumped Hydro Energy Storage System: A Technological Review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 586–598, 2015.

- [5] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, 2nd ed. IEEE Press, 2003.
- [6] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1998.
- [7] International Energy Agency (IEA), *Hydropower Special Market Report*, Paris, France, 2021.
- [8] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, Abu Dhabi, UAE, 2017.
- [9] H. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, and J. Salpakari, „Energy Storage and Smart Energy Systems,” *Energy*, vol. 137, pp. 556–565, 2017.
- [10] D. Joksimović, Z. Ćirić, N. Milojević, D. Arnautović, D. Stojić, M. Milinković, S. Veinović, and D. Petrović, „Parametri pobudnih sistema,” *Elektroprivreda*, vol. 64, no. 3, pp. 198–206, 2011.
- [11] IESO-E, *System Needs and Market Solutions Report*, Brussels, Belgium, 2022.
- [12] H. Zhao, L. Xu, and J. Wang, „Review of Frequency Stability in Power Systems with High Renewable Penetration,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 166654–166666, 2020.
- [13] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, „Definition and Classification of Power System Stability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1387–1401, 2004.
- [14] IEEE Std 421.1-2007, „IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines,” New York, NY, USA: IEEE, 2007.
- [15] IEEE Std 421.2-2014, „IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems,” New York, NY, USA: IEEE, 2014.
- [16] IEEE Std 421.3-1997, „IEEE Standard for High-Potential Test Requirements for Excitation Systems for Synchronous Machines,” New York, NY, USA: IEEE, 1997.
- [17] IEEE Std 421.4-2014, „IEEE Guide for Preparation of Excitation System Specifications,” New York, NY, USA: IEEE, 2014.
- [18] IEEE Std 421.5-2016, „IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,” New York, NY, USA: IEEE, 2016.
- [19] IEC 60034-16, *Rotating Electrical Machines – Excitation Systems for Synchronous Machines*, Geneva, Switzerland: IEC.
- [20] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, „Optimum Settings for Automatic Controllers,” *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759–768, 1942.
- [21] K. J. Åström and T. Häggglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. ISA, 2006.
- [22] R. J. Koessler, „Techniques for Tuning Excitation System Limiters,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 3, pp. 585–591, 1994.

- [23] IEEE Power Engineering Society, *Excitation Systems Tutorial*, New York, NY, USA: IEEE, 1996.
- [24] C. A. Canizares, „Underexcitation Limiters and Their Impact on System Stability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 483–489, 1995.
- [25] D. Joksimović, Đ. Stojić, S. Veinović, and D. Marčetić, „Reactive Power Controller for Underexcitation Limiter with Regard to Electromechanical Oscillations,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 45001–45015, 2024.
- [26] E. V. Larsen and D. A. Swann, „Applying Power System Stabilizers: Part I,” *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, vol. PAS-100, no. 6, pp. 3017–3024, 1981.
- [27] M. J. Gibbard and D. J. Vowles, *Small-Signal Stability, Control and Dynamic Performance of Power Systems*, Adelaide, Australia, 2015.
- [28] F. Milano, *Power System Modelling and Scripting*, Berlin, Germany: Springer, 2010.

БИОГРАФИЈЕ



Душан Јоксимовић је рођен 1982. године. Дипломирао је 2005. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Одсеку за електроенергетске системе, где је и магистрирао 2013. године.

Тренутно је студент докторских студија на Факултету техниких наука Универзитета у Новом Саду, на Одсеку за енергетику, електронику и телекомуникације. У Центру за аутоматiku и регулацију Електротехничког института „Никола Тесла” запослен је од 2006. године, где се тренутно налази на позицији стручног саветника. Поседује богато искуство и експертизу у развоју, пројектовању, производњи и испитивању система побуде за синхроне ротационе машине. Поред тога, поседује дубоко познавање процеса развоја, пројектовања и израде система за аквизицију података. Такође, има богато искуство у експерименталном одређивању параметара и карактеристика синхроних генератора.

ORCID: 0000-0001-8070-9412



Ђорђе Стојић је рођен у Београду, Србија, 1970. године. Дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 1994. године, где је такође магистрирао 1996. и докторирао 2004. године у области индустријске електронике. Од 1994. године запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла” у Београду. Његова истраживачка интересовања обухватају системе управљања, енергетске претвараче и погоне наизменичних мотора.

ORCID: 0000-0002-4716-0488



Немања Милојчић је рођен 1982. године у Београду. Основну школу и гимназију Природно-математичког смера завршио је у Младеновцу. Године 2005. дипломирао је на енергетском одсеку Електротехничког факултета Универзитета у

Београду. По завршетку студија радио је на

пословима развоја и пројектовања уљних и сувих енергетских трансформатора у компанији „АБС – Минел трафо” у Младеновцу. Од 2007. године запослен на Електротехничком институту „Никола Тесла” у Београду у Центру за аутоматiku и регулацију, где се бави проблемима регулације и управљања у електроенергетским системима, развојем, пројектовањем и испитивањем побудних система синхроних машина, испитивањем електричних машина, релејном заштитом, електричним мерењима и аутоматизацијом малих електрана. Од 2024. године ради на позицији сениор инжењера у Одељењу истраживања и развоја апликативних функција заштитних релеја у компанији „HITACHI Energy” Шведска.

ORCID: 0009-0005-2806-4641



Зоран Ћирић је дипломирани инжењер електротехнике из Пирота. Рођен је 1950. године. Завршио је Електротехнички факултет Универзитета у Београду. У претходном периоду у Центру за аутоматiku и

регулацију у Електротехничком институту „Никола Тесла” радио на пројектима развоја, пројектовања, израде, уградње, испитивања и пуштања у рад система побуда синхроних генератора у термоелектранама и хидроелектранама. Као истраживач је учествовао на више пројеката Министарства науке Републике Србије који се у ширем смислу тичу области регулације електроенергетских система, унапређења енергетске ефикасности, примене уређаја и технологија енергетске електронике итд. У досадашњем раду се бавио и проблематиком електричних заштита генератора у термоелектранама и хидроелектранама, као и проблемима везаним за процес синхронизације генератора на електроенергетску мрежу. Учествовао је и бавио се пројектима развоја интегрисаних система управљања радом малих хидроелектрана. Учествовао је и бави се испитивањима и одређивањем параметара синхроних генератора. Бави се пројектовањем и израдом уређаја за аквизицију сигнала и континуални мониторинг различитих система и постројења у оквиру енергетских објеката.

ORCID: 0009-0000-5904-8357



Славко Веиновић је рођен у Сомбору, Србија, 1983. године. Дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2008. године, где је и докторирао 2025. године. Запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла” у Београду од 2009. године.

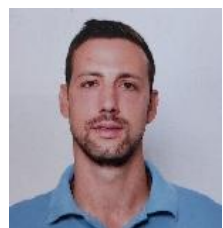
ORCID: 0000-0001-7064-976X



Лука Ивановић је рођен 1997. године у Ваљеву. Основне и мастер студије завршио је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Сигнали и системи, где је стекао темељна знања из области обраде сигнала,

машинског учења, система управљања и уграђених система. Тренутно је на докторским студијама из области управљања системима и обраде сигнала. Професионалну каријеру започео је праксом у компанији ЕНЕЛ д. о. о, где се бавио ПЛЦ програмирањем и развојем модела за обуку. Од фебруара 2021. године запослен је у Институту „Никола Тесла” у Београду као *embedded software* инжењер. У оквиру свог делокруга рада учествује у развоју алгоритама за системе побуда синхроних машина, програмирању микроконтролера, индустријској комуникацији и интеграцији нисконапонске електронике за процесну контролу. Поред професионалног ангажмана, активно се бави научним радом, а његови истраживачки интереси укључују примену машинског учења у електроенергетици, обраду сигнала и оптимизацију управљања електроенергетским системима. Аутор је више научних радова, укључујући области моделовања синхроних генератора и стабилности напона у микромрежама са прикљученим ветроелектранама.

ORCID: 0000-0003-4345-4523

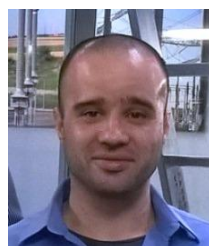


Илија Класнић је рођен 1989. године. Завршио је основне студије 2012. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, одсек Енергетика, модул Енергетски претварачи и погони. Мастер студије је завршио 2013. године

док је докторску дисертацију под насловом „Естимација и предикција термичког стања ротора хидрогенератора и утицај на граничне вредности реактивних снага” успешно одбранио 29. 9. 2023. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Од фебруара 2013. године запослен је у Електротехничком институту „Никола Тесла” у

Београду где је ангажован на пословима пројектовања, израде и пуштања у рад система побуде синхроних генератора, примопредајним и гаранцијским испитивањима обртних електричних машина, испитивањима енергетских претварача, консултантским услугама у области електроенергетике, термичком моделовању синхроних генератора. Аутор је или коаутор неколико радова публикованих у часописима са импакт фактором и презентованих на скуповима националног и међународног значаја. Добитник је награде за најбољи рад младог истраживача на секцији Електроенергетика 58, конференције ЕТРАН. Секретар је студијског комитета СТК А1 Обртне електричне машине у оквиру CIGRE Србија, и редован је члан СТК А1 Обртне електричне машине у оквиру међународне CIGRE.

ORCID: 0000-0002-7908-9110



Мирослав Павићевић је рођен 1980. године у Ужицу. Дипломирао је на Електротехничком факултету у Београду, смер Енергетика, Одсеку за електроенергетске системе. Од јануара 2006.

запослен у ЕПС-у, ХЕ „Бајина Башта”, где је прошао све нивое од приправника до главног инжењера. Од 2020. године ради на позицији руководиоца Службе електроодржавања. Активно учествовао у ревитализацијама ХЕ и РХЕ „Бајина Башта” као стручни надзор за све енергетске секције. Године 2011. радио за „Siemens AG Österreich”, као шеф градилишта и главни електроинжењер, на изградњи РП „Зестафони” 500 kV у Грузији. Поседује значајно искуство у пројектовању, уградњи, испитивању и одржавању ВН разводних постројења, система релејних заштита, побудних система и хидрогенератора.

ORCID: 0009-0007-8155-9285



Душан Тришић је рођен 1963. године. Дипломирао је 1988. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Одсеку за електроенергетске системе. У ЕПС-у, ХЕ „Бајина Башта”, запослен је од 1994. године, где се

тренутно налази на позицији директора за производњу енергије Огранка „Дринско-лимске ХЕ”. Поседује богато искуство у одржавању, испитивањима и реконструкцијама система побуде, система турбинске регулације и система нумеричких заштита за класичне и реверзибилне хидроагрегате.

ORCID: 0009-0003-9337-7615

Dušan Joksimović¹, Đorđe Stojić¹, Nemanja Milojčić¹, Zoran Ćirić¹,
Slavko Veinović¹, Luka Ivanović¹, Ilija Klasnić¹, Miroslav Pavićević², Dušan Trišić²



Design and Dynamic Performance of Redundant Excitation Systems for Motor-Generators at Bajina Basta Pumped-Storage Hydro Power Plant

¹ Nikola Tesla Institute of Electrical Engineering JSC Belgrade, Serbia*

² EPS JSC, Branch Drinsko-Limske HPPs, HPP Bajina Bašta, Serbia

Professional article

Highlights

- Revitalization of the units at PSHPP "Bajina Bašta" – crucial for system stability and the integration of renewable energy sources.
- Modern excitation regulators enable complete control of the units in all operating states, with high reliability ensured by a redundant (1+1) architecture of thyristor bridges and control units.
- Support for unit operation in all four quadrants of the capability diagram, including synchronous start and electrical breaking.

Abstract

The run-of-river and pumped-storage hydro power plants (PSHPP) "Bajina Bašta" in Perućac represent the largest hydroelectric facilities built on the Drina River. PSHPP "Bajina Bašta" is of immense importance to the Serbian power system due to its ability to operate in both generator and motor modes, which increases system flexibility in terms of production and consumption management. Additionally, due to its capability for rapid startup and quick transitions between generator and motor modes, this plant can react swiftly to system disturbances and replace any other unit within the "Elektroprivreda Srbije" system. Consequently, the revitalization of PSHPP "Bajina Bašta," aimed at extending the units' lifespan for several decades, is of great significance to the power system. During 2024, the first unit was revitalized, while the revitalization of the second unit was completed in 2026. As part of the revitalization, the entire excitation systems were replaced. High-performance components were installed within the power section of the excitation system: excitation transformers, circuit breakers, thyristor bridges, de-excitation equipment, etc. The core of the control section consists of certified digital excitation regulators, which feature integrated sequential automation for all operating modes: generator mode, motor mode, synchronous start, and electrical braking. The regulators enable various control modes: automatic stator voltage regulation, reactive power regulation, or power factor regulation, along with integrated limiter functions and a power system stabilizer. System reliability is further ensured by the redundant implementation of thyristor bridges and excitation regulators in a 1+1 configuration. Following the completion of installation and connection of all equipment, detailed tuning and testing of the excitation system were conducted, demonstrating high system performance. This guarantees reliable and stable operation of the units in all intended modes, with automatic operation limiting within the defined boundaries of the capability diagram.

Keywords

Excitation system, Motor-generator, Reliability, Revitalization

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Excitation Systems for Motor-Generators in the Bajina Bašta Pumped-Storage Hydropower Plant" (<https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/cigre37-a1-8/>), awarded in the Expert Committee EC-A1 Electrical Machines, at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, 26-30 May 2025.

Received: April 6th, 2026

Reviewed: June 30th, 2026

Modified: July 9th, 2026

Accepted: July 14th, 2026

*Corresponding author: Dušan Joksimović, phone: +381 64/82-59-741

E - mail: dušan.joksimovic@icent.org



Јелица Јанићијевић¹, Данило Влаховић¹, Александар Латиновић¹, Жељко Ђуришић¹



Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2 ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим изворима енергије

¹ Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, Београд, Србија*

<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.2>

Оригинални научно-истраживачки рад

Кључне поруке

- Анализирани су кључни технолошки принципи, ограничења и предности савремених метода производње зеленог водоника, са фокусом на електролизу
- Сагледани су изазови и решења у складиштењу водоника
- Приказани су технолошки трендови који убрзавају примену водоника у енергетским системима: раст капацитета електролизера, пад трошкова и унапређена интеграција са ОИЕ
- Рад истиче значај оптимизације инфраструктуре и развоја исплативих решења као предуслова за ширу употребу водоника у процесу декарбонизације

Кратак садржај

Интеграција обновљивих извора енергије (ОИЕ) у електроенергетске системе (ЕЕС) представља изазов због њиховог варијабилног и неуправљивог карактера, што отежава билансирање производње и потрошње. Стабилан рад ЕЕС-а захтева управљиве изворе енергије. С друге стране, потискивање и гашење термоелектрана у процесу декарбонизације, која су предвиђена интегрисаним националним и климатским планом, смањује расположиву управљиву енергију што угрожава услове билансирања и енергетске независности ЕЕС-а. Једно од решења јесте коришћење вишкова енергије из ОИЕ за производњу водоника и његових деривата, који се могу складиштити и користити у гасним електранама као управљив извор енергије.

У овом раду анализирани су услови формирања енергетског комплекса за производњу, складиштење и употребу водоника на локацији постојеће ТЕ „Никола Тесла А”. Основна идеја је да се електрана у будућности не угаси, већ да пређе са лигнита на обновљиво гориво, заменом конвенционалних котлова и парних турбина гаснотурбинским постројењима прилагођеним сагоревању водоника. На тај начин задржава се кључна инфраструктура, нарочито прикључно разводно постројење и развијена интерконективна веза овог важног генераторског чворишта.

Анализиран је и потенцијал производње водоника из фотонапонских електрана које би биле изграђене на простору некадашњих Колубарских копова. Приказано је идејно решење технолошке шеме процеса производње, компресије, складиштења и употребе водоника, уз прорачун енергетске ефикасности комплетног система. На основу доступних података извршена је прелиминарна процена очекиване цене произведене електричне енергије.

Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију студентског рада „Идејно решење декарбонизације производње електричне енергије у ТЕ 'Никола Тесла' применом водоничних технологија са обновљивим изворима” (<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.2>), награђеног у Студијском комитету СТЕ-ЦЗ Одрживост ЕЕС-а и перформансе заштите животне средине, на 37. Саветовању CIGRE Србија, Златибор, 26-30. маја 2025.

Примљено: 7. јануар 2026. Рецензирано: 1. јули 2026.

Измењено: 10. јули 2026. Одобрено: 13. јули 2026.

* Кореспондирајући аутор: Јелица Јанићијевић, +381 61/81-51-629

Имејл: jelicajanicijevic616@gmail.com

Јелица Јанићијевић и остали: Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2 ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим изворима енергије

Концепт подразумева да се у периодима ниских тржишних цена електричне енергије енергија из фотонапонских постројења или преносне мреже усмерава на електролизу, док се произведени водоник складишти и користи у периодима високе потрошње и недостатка енергије из расположивих примарних извора у систему. Додатно, топлота добијена током електролизе и сагоревања водоника може се користити за складиштење и снабдевање топлотног конзума, чиме се повећава укупна ефикасност система.

Кључне речи

Водоник, декарбонизација, обновљиви извори енергије, ТЕ „Никола Тесла”

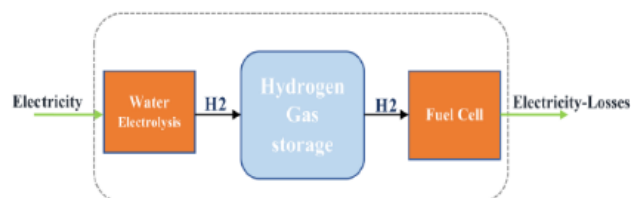
1. УВОД

Проблем исцрпљености резерви угља и његов све лошији квалитет, као и старост термоенергетских блокова у термоелектранама у Србији, доводе до проблема одрживости производње електричне енергије у термоелектранама. Србија је суочена и са проблемима локалног загађења ваздуха у многим градовима, које је у одређеној мери у вези са производњом електричне енергије у термоелектранама, као и добијања топлотне енергије у малим ложиштима. Осим локалних проблема, производња електричне енергије из термоелектрана дугорочно није прихватљива и због ефеката глобалног загревања изазваног емисијом CO_2 , због којег су термоелектране суочене са трошковима карбонских такси. С друге стране, електрификација транспорта и индустријски развој захтевају повећање производње електричне енергије.

У таквим условима, глобални енергетски сектор се суочава са изазовима декарбонизације и преласка на обновљиве изворе енергије, при чему водоник и његови деривати постају обећавајуће технологије у процесу транзиције. Основни проблем интеграције обновљивих извора енергије у електроенергетским системима представља проблем билансирања, односно усклађивање дијаграма производње из ОИЕ и захтева потрошње. Због интермитентности и неуправљивости производње из ОИЕ, за стабилан рад ЕЕС-а и поуздано снабдевање електричном енергијом неопходно је обезбедити изворе управљиве производње. С друге стране, потискивање и гашење термоелектрана у процесу декарбонизације смањује расположиву управљиву енергију, што угрожава услове билансирања и енергетске независности електроенергетског система.

Водоник се појављује као потенцијално решење за складиштење енергије произведене из ОИЕ путем електролизе воде, чиме се омогућава каснија конверзија у електричну енергију сагоревањем у гасним турбинама или горивним ћелијама, Слика 1. Употреба зеленог водоника у циклусу „енергија у

енергију” представља еколошки прихватљив начин складиштења енергије.



Слика 1. Шема система за производњу и складиштење водоника и сагоревања у горивним ћелијама, [1]

Водоник се већ користи у различитим секторима широм света као средство за декарбонизацију и складиштење енергије. У енергетици, Данска користи енергију ветра за производњу зеленог водоника у оквиру H2RES пројекта. Беч тестира употребу водоника у термоелектрани-топлани „Donau Stadt” како би смањио емисије CO_2 , [2]. У транспорту, Немачка и Јапан су развили водоничне возове (Alstom Coradia iLint, [3], и Hydrogen Hybrid Train), док Јужна Кореја користи водоничне аутобусе у урбаном превозу, [4]. Индустријски сектор такође примењује водоник – „Shell” гради највећу фабрику зеленог водоника у Европи, док норвешка компанија „Yara” користи водоник за производњу амонијака и његово коришћење уместо природног гаса, [5]. Дубаи је развио постројење за производњу водоника коришћењем соларне енергије, омогућавајући складиштење вишка енергије за каснију употребу, [6].

2. ЕНЕРГЕТСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ВОДОНИКА

Водоник је открио Хенри Кавендиш 1766. године. Водоник значи стваралац (ген) воде (хидро); његовим сагоревањем ослобађа се само вода, као најзаступљеније хемијско једињење на Земљи. Водоник је трећи најраспрострањенији елемент на Земљиној површини (после кисеоника и силицијума). Иако је један од најзаступљенијих елемената, водоник у молекуларном облику (H_2) готово да и не постоји слободан на Земљи, већ се мора издвајати из својих једињења, а пре свега воде, за шта је потребно улагати

енергију. Из овог разлога, водоник се посматра као енергетски носач, односно као складиште енергије, јер је за његову производњу потребно уложити енергију, која се затим поново може добити његовим сагоревањем или директном конверзијом у електричну енергију у горивним ћелијама. Водоник има највећу енергетску густину по маси од свих конвенционалних горива, 1 kg водоника садржи отприлике исто енергије као 2,8 kg бензина, [7].

Велика распрострањеност у природи, енергетска вредност и еколошка прихватљивост при његовом сагоревању кључни су разлози због којих се на глобалном нивоу и националним нивоима готово свих земаља развијају водоничне стратегије, које сагледавају потенцијал овог горива као главног носиоца у процесу енергетске транзиције. Ипак, производња, складиштење и употреба водоника су повезани са многим изазовима, што је привукло научну заједницу која се већ деценијама бави водоником као енергетским носачем. У раду [8] дати су преглед и анализа истраживања енергије водоника током три деценије (од 1990. до 2023. године), са посебним фокусом на еволуцију технологија производње водоника из обновљивих извора енергије. Циљ студије је да пружи перспективу о истраживачким трендовима, технолошком напретку и интердисциплинарној сарадњи, која је неопходна да би се перформансе водоничних система развиле до нивоа који ће обезбедити његову техничку и економску прихватљивост за широку примену у пракси, чиме би могли бити решени кључни проблеми одрживих енергетских система.

2.1 Енергетска густина водоника

Енергетска густина водоника представља кључни фактор у његовој примени као енергетског вектора, нарочито када се пореди са конвенционалним фосилним горивима. Може се посматрати кроз две главне димензије: гравиметријску и волуметријску енергетску густину.

2.1.1 Гравиметријска енергетска густина (по маси). Водоник поседује високу гравиметријску енергетску густину која износи око 142 MJ/kg (HHV – виша топлотна вредност), што га у поређењу са фосилним горивима чини супериорним нарочито у транспортним системима (авионима и аутомобилима), где маса горива дефинише многе перформансе превозног средства (као што су ефикасност, убрзање и аутономија), [9].

2.1.2 Волуметријска енергетска густина (HHV по запремини). Супротно гравиметријској, водоник је ограничен релативно ниском волуметријском енергетском густином у поређењу са већином конвенционалних фосилних горива. Ово значи да је за складиштење исте количине енергије потребан знатно већи простор у поређењу са другим горивима. Специфичне вредности волуметријске енергетске густине водоника и других горива су следеће, [9]:

- у гасовитом стању под стандардним атмосферским притиском, водоник има приближно 0,012 MJ/L;
- када се водоник компримује на 700 бара, његова волуметријска енергетска густина достиже 5,6 MJ/L;
- за течни водоник волуметријска енергетска густина износи 10,1 MJ/L.

Поређења ради, конвенционална горива имају знатно већу волуметријску енергетску густину: керозин – 36,7 MJ/L; дизел – 34,6 MJ/L; бензин – 34,2 MJ/L, [9].

Амонијак (NH_3) такође се истиче као носилац водоника са повољном енергетском густином. Течни амонијак, под амбијенталним притиском, има енергетску густину од приближно 11,5 MJ/L. Ова вредност значајно премашује гасовити водоник у стандардним условима, па чак и компримовани течни водоник, што га чини атрактивним за дуготрајно складиштење и транспорт енергије.

Изазов ниске волуметријске енергетске густине водоника, посебно у гасовитом стању, захтева напредне технологије складиштења, што представља један од главних изазова за ефикасну примену водоника као носача енергије.

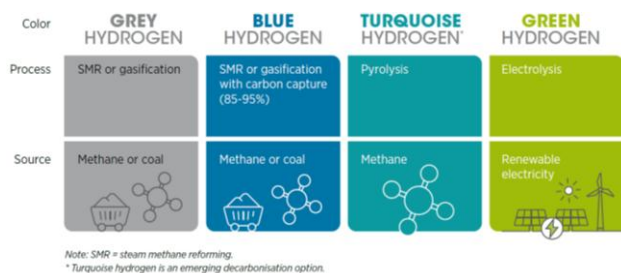
2.2 Подела водоника на основу начина добијања

За издвајање водоника из његових хемијских једињења у природи неопходно је утрошити енергију. Постоји више метода добијања водоника при чему оне имају различит утицај на животну средину, пре свега у погледу емисије гасова са ефектом стаклене баште. Подела водоника по „бојама” систем је класификације који се користи за категоризацију водоника на основу његовог метода производње и повезаних емисија гасова стаклене баште (GHG). Ова терминологија помаже да се разликују различити типови водоника у погледу њиховог утицаја на животну средину и одрживости у контексту глобалне енергетске транзиције. На Слици 2 илустроване су основне боје у погледу класификације водоника на основу извора и метода примењеног за његово издвајање. Треба напоменути да ово није унифицирана класификација, тако да се у литератури могу срести и друге боје у класификацији водоника, као што су црна и браон, или пинк којом је категорисан водоник који се добија из електричне енергије која потиче из нуклеарних електрана.

2.2.1 Сиви/Црни водоник (Grey/Black Hydrogen).

Ова категорија се односи на водоник произведен из фосилних горива, без хватања угљеника. На пример, природни гас без CCUS (*Carbon Capture, Utilization, and Storage*) и угљана гасификација без CCUS представљају производне руте са значајним емисијама. Ово се сматра производњом из неублажених фосилних горива. Ове методе имају висок угљенични отисак и представљају конвенционалне начине производње водоника, које транзиција настоји да замени.

Јелица Јанићијевић и остали: Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2 ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим изворима енергије



Слика 2. Класификације водоника на основу извора и метода примењеног за његово издвајање, [10]

2.2.2 Плави водоник (Blue Hydrogen). Плави водоник је водоник произведен из фосилних горива (као што су природни гас или угљ) у комбинацији са технологијом хватања, коришћења и складиштења угљеника (CCUS). На пример, производња водоника из реформирања метана паром (SMR) са CCUS-ом или угљане гасификације са CCUS-ом спада у ову категорију. Циљ CCUS-а је смањење угљеничног отиска водоника произведеног из фосилних горива. Сертификације за нискоугљенични или „плави” водоник захтевају значајно смањење емисија GHG-а, често најмање 30%, а у неким случајевима 70% или 73% мање у поређењу са производњом из фосилних горива без ублажавања, што се може узети као квантитативни праг за класификацију водоника као плавог, [11].

2.2.3 Тиркизни водоник (Turquoise Hydrogen). Тиркизни водоник се производи из природног гаса као сировине. Кључни процес производње је пиролиза метана. За разлику од традиционалних метода које користе фосилна горива, пиролиза метана за производњу тиркиз водоника не производи CO₂ емисије. Уместо тога, угљеник из метана се претвара у чврсти угљенични пигмент (*carbon black*). Чврсти угљенични пигмент се знатно лакше складишти него гасовити CO₂.

2.2.4 Зелени водоник (Green Hydrogen). Зелени водоник се дефинише као водоник произведен путем електролизе воде коришћењем електричне енергије генерисане из нискоемисионих извора, посебно обновљивих извора као што су фотонапонске електране и ветроелектране. Дакле, производња зеленог водоника представља решење без емисије CO₂, па се из тог разлога ова категорија водоника највише истражује у оквиру водоничних стратегија за одрживу енергетику.

Иако се производи из обновљивих извора, треба имати у виду да је потпуну емисију CO₂ практично немогуће извести зато што се и за производњу елемената обновљивих извора, из којих се производи зелени водоник, ипак емитује нека количина CO₂. За сертификацију зеленог водоника нису прописани јединствени стандарди. Тако, на пример, у Индији стандард за зелени водоник захтева максимално емисију од 2 kg CO₂-eq/kg H₂, док је у Европској унији тај стандард 3,4 kg CO₂-eq/kg H₂.

2.2.5 Водоник са ниским емисијама. Поред категоризације по бојама, Међународна агенција за енергију (IEA) често у својим извештајима користи шири термин „водоник са ниским емисијама” (*Low-Emissions Hydrogen*), који практично обухвата зелени и плави. Према извештају [11], водоник са ниским емисијама укључује водоник произведен путем електролизе воде електричном енергијом из нискоемисионих извора (обновљиви извори или нуклеарна енергија), као и водоник произведен из биомасе или фосилних горива са CCUS технологијом. Овај термин служи као свеобухватна категорија која укључује и зелени и плави водоник, наглашавајући напоре за смањење емисија гасова стаклене баште у производњи водоника.

За категоризацију водоника са ниском емисијом такође нису јединствени стандарди, тако је, на пример, у Бразилу граница 7 kg CO₂-eq/kg H₂, док је у САД та граница 4 kg CO₂-eq/kg H₂, [11].

Зелени водоник је енергетски носач који се може користити у многим различитим апликацијама. Међутим, његова стварна употреба је још увек веома ограничена. Данашња производња водоника се углавном заснива на природном гасу и угљу, који заједно чине 95% производње. Тренутно не постоји значајна производња водоника из обновљивих извора, али је ова проблематика врло заступљена у научним круговима, како у погледу развоја технологија тако и у погледу интеграције водоничних система у перспективним електроенергетским системима.

3. ТЕХНОЛОШКИ ТРЕНДОВИ У ПРОИЗВОДЊИ И СКЛАДИШТЕЊУ ЗЕЛЕНОГ ВОДНИКА

Развој технологија производње и складиштења водоника усмерен је на повећање ефикасности и смањење трошкова процеса, чиме се омогућава шира комерцијална примена водоника као енергетски одрживог решења. Тренутно се у производњи водоника примењују различите методе, међу којима је електролиза воде најперспективнија када се користи електрична енергија из обновљивих извора. Савремене технологије електролизе воде заснивају се на претварању електричне енергије у хемијску енергију водоника и кисеоника путем електрохемијских реакција разлагања воде. У контексту великих енергетских система и интеграције обновљивих извора енергије, данас се користе три главне технолошке платформе:

1. Алкална електролиза (AEL – *Alkaline Electrolysis*);
2. Протонска мембранска електролиза (PEM – *Proton Exchange Membrane Electrolysis*);
3. Електролиза са чврстим оксидом (SOEC – *Solid Oxide Electrolysis Cell*).

Свака од ових технологија има своје специфичне техничке карактеристике, предности и ограничења, као и различит ниво технолошке зрелости (TRL – *Technology Readiness Level*). Како је Термоелектрана „Никола Тесла (ТЕНТ) А” производни систем високог

капацитета, од кључног је значаја разумети детаљне перформансе, ограничења и динамичке карактеристике PEM електролизе, која је изабрана за ово идејно решење, [12].

Табела I Упоредне карактеристике AEL, PEM и SOEC технологија, [13]

Карактеристика	AEL	PEM	SOEC
Радна температура	70–90°C	50–80°C	700–850°C
Радни притисак	1–30 bar	<30 bar	~1 bar
Ефикасност (LHV)	50–68%	50–68%	75–85%
Покретање до номиналне вредности	<50мин	<20мин	>600мин
Зрелост технологије	Висока	Висока	Ниска
Инвестициони трошак	Најнижи	Висок	Највиши
Отпорност на промене снаге	Слаба	Одлична	Слаба

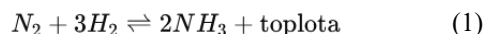
За потребе велике варијабилности снаге и динамичког погона, PEM електролиза је тренутно једина технологија која може да прати рад фотонапонске (PV) електране и ценовне сигнале, управо због брзог одзива, широког радног опсега и могућности рада при променљивом оптерећењу [12].

Складиштење водоника представља технолошку препреку његовој интеграцији у глобалну економију. Неопходни су капацитети за велике количине водоника како би се складиштила енергија у размерама GWh и TWh. Геолошке формације као што су рудници соли, исцрпљена нафтна и гасна лежишта нуде огроман потенцијал складиштења како због својих капацитета и сигурности тако и због економских и техничких фактора [14]. Поред подземних система, примењују се и надземна решења као што су резервоари за компримовани водоник под високим притисцима и криогени танкови за течни водоник, а у развоју су и алтернативни концепти попут течних органских носача водоника (LOHC – *Liquid Organic Hydrogen Carrier*), који омогућавају складиштење при умереним условима и коришћење постојеће инфраструктуре [14].

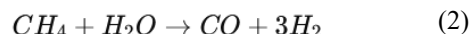
Иако физичке методе складиштења водоника, попут компримованог и течног водоника, као и LOHC система, имају значајну примену у краткорочном и средњорочном балансирању, за потребе дугорочног складиштења енергије све већу пажњу привлаче хемијски носачи водоника. Међу њима се посебно издваја амонијак (NH₃), који захваљујући високој густини водоника, развијеној глобалној логистичкој инфраструктури и могућности директног сагоревања

у гасним турбинама представља једно од најперспективнијих решења за сезонско складиштење енергије и енергетску конверзију у постројењима великих снага [15], [16]. Управо из тог разлога, амонијак заузима значајно место у овом идејном решењу као кључни елемент за сезонско балансирање ЕЕС-а и допуне капацитета водоничног горива.

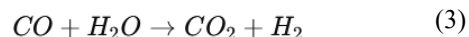
Амонијак, са 18% водоника по маси, има око 50% већу густину водоника у поређењу са компримованим или течним водоником, док му је густина енергије скоро три пута већа. Једна од кључних предности је постојање развијене инфраструктуре за производњу, дугорочно складиштење, транспорт и дистрибуцију амонијака широм света [15]. Главне мане су што је токсичан, може бити опасан при цурењу и што постројење за производњу амонијака додатно повећава инвестиционе трошкове. Његова производња се досад одвијала углавном путем Хабер–Бошовог процеса, у коме се азот и водоник комбинују при високим температурама и притисцима, уз катализаторе [16]:



Хабер–Бошов процес се ослања на парно реформисање метана (SMR – *Steam Methane Reforming*) за добијање водоника:



Након тога, угљен-моноксид се конвертује у угљен-диоксид кроз *water-gas shift* реакцију:



Главни проблем класичног Хабер–Бошовог процеса је висока емисија угљен-диоксида, јер је већина амонијака произведена из природног гаса. Алтернативна метода за смањење емисија је добијање амонијака из зеленог водоника, добијеног електролизом воде коришћењем вишкова електричне енергије из ОИЕ, такозвани зелени амонијак, што ће се и користити у овом идејном решењу [16]. Такође, могућа је директна електрохемијска синтеза амонијака, коришћењем електричне енергије за комбиновање азота и водоника у амонијак, чиме ће се смањити потреба за високим притиском и температурама. Електрохемијска синтеза амонијака је још у раној фази истраживања и развоја и још увек није достигла технолошку зрелост, али би она потенцијално могла имати нижу потрошњу енергије у поређењу са конвенционалним Хабер–Бошовим процесом [16]. Предвиђа се да ће зелени амонијак до 2035. године бити економски исплативији у односу на фосилна горива. Укупна енергетска ефикасност циклуса производње и сагоревања амонијака креће се приближно између 30% и 48%. Сагоревањем амонијака у електранама може се достићи упоредива ефикасност као и при конвенционалним

Јелица Јанићијевић и остали: Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2 ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим изворима енергије

термоенергетским процесима, што указује на његов потенцијал као горива без угљеника [17].

Поред компримованог и течног водоника, LOHC система и амонијака, потребно је поменути и складиштење водоника у чврстом стању, односно *solid-state hydrogen storage*. Овај приступ заснива се на везивању водоника унутар чврстих материјала, најчешће металних хидрида, као што су MgH_2 , $LaNi_5H_6$, $TiFe$ -хидриди и високоентропијске легуре [18]. Главна предност ових система је већа безбедност, јер се водоник не складишти као слободан гас под високим притиском, већ је везан у структури материјала, чиме се смањује ризик од цурења и експлозије. Ипак, због веће масе материјала, потребе за управљањем температуром, спорије кинетике и виших трошкова, ова технологија се у овом раду не разматра као основно решење за велика сезонска складишта, већ као перспективна опција за будућу примену [18].

Гаснотурбинске технологије прилагођене сагоревању водоника све више добијају на значају. Модерне комерцијалне гасне турбине већ сада могу користити мешавине водоника и природног гаса, док су у развоју и потпуно водоничне турбине [19]. Њихова примена у термоелектранама попут ТЕНТ-а А омогућила би значајно смањење емисија CO_2 уз очување постојећих електроенергетских капацитета и инфраструктуре.

Упркос значајним технолошким напрецима, кључни изазови и даље обухватају смањење трошкова опреме, повећање ефикасности производње и складиштења, као и развој инфраструктуре за транспорт и дистрибуцију водоника, што отвара питање његове интеграције у постојеће термоенергетске системе, које ће бити анализирано у наставку рада.

4. ИДЕЈНО РЕШЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКОГ КОМПЛЕКСА

У циљу преласка на еколошко прихватљиву производњу енергије у процесу декарбонизације неопходно је окренути се обновљивим изворима енергије. Како је ТЕНТ важно производно чвориште ЕЕС-а Србије, у циљу очувања већ постојеће централизоване инфраструктуре предложено је идејно решење постављања соларне електране у непосредној близини ТЕНТ-а, која би потпомогла супституцију угља зеленим водоничним горивом. Почетна фаза подразумева имплементацију ове промене на блоковима А1 и А2, чиме се започиње прелаз на еколошки прихватљивије изворе енергије. Основна идеја је да се производња из ова два најстарија термоагрегата надомести из фотонапонске електране и гаснотурбинског постројења на водонична горива, али да се одржи управљивост производње и унапреди флексибилност система.

Ниска густина снаге соларног зрачења на површини Земље захтева покривање великих површина соларним панелима. Како би се смањили негативни утицаји на животну средину, ове електране је потребно градити на девастираним земљиштима. У том контексту, термоелектране, које су током деценија експлоатације угља створиле простране неплодне површине услед ископа и одлагања јаловине и пепела, представљају погодне локације за инсталацију соларних панела.

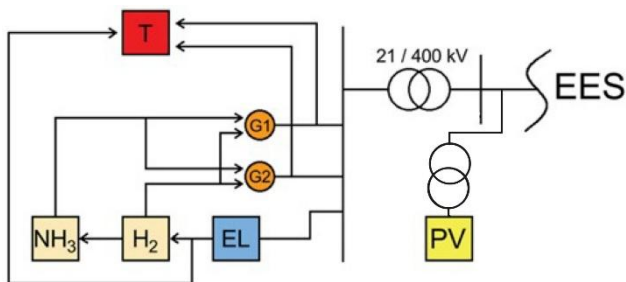
Планирани концепт предвиђа изградњу фотонапонских електрана на овим деградираним подручјима, на деловима Колубарских копова, док би у оквиру постојећих термоенергетских комплекса били постављени капацитети за производњу и складиштење водоника и амонијака. Такође, веома битна чињеница и предност за производњу водоника је то да имамо већ развијен систем допремања воде из реке Саве, што нам у старту смањује трошкове и омогућава искоришћење постојеће инфраструктуре. Уместо котловских система и парних турбина, нова електрана би користила гаснотурбинске системе који би сагоревали водоник и амонијак, чиме би се омогућило очување постојеће инфраструктуре (прикључних и разводних постројења у термоелектрани), како би се задржали и постојећи енергетски токови у преносној мрежи.

Соларна електрана би имала двоструку функцију – директно инјектирање произведене снаге у мрежу 400 kV у близини постојећег прикључног чворишта ТЕНТ-а (ПРП „Младост”), као и снабдевање енергијом система за производњу водоника. Капацитет складиштења водоника био би дизајниран за балансирање дневних и недељних варијација у производњи и потрошњи енергије. Део водоника користио би се за синтезу амонијака, који би због својих бољих складишних карактеристика представљао дугорочно складиште енергије. Предложени концепт је илустрован на Сlici 3.

4.1 Предлог изградње фотонапонске електране на деградираном земљишту угљенокопа „Колубара”

Ради искоришћења девастираног земљишта, фотонапонска електрана би се градила на површинама Колубарских копова. Коришћење оваквих локација представља оптимално решење јер не долази до заузимања пољопривредног или инфраструктурно вредног земљишта, избегавају се трошкови експропријације, а пројекат остварује већу еколошку и друштвену прихватљивост.

Јелица Јанићијевић и остали: Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2 ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим изворима енергије



Слика 3. Шематски приказ функционисања енергетског производног комплекса на бази фотонапонске електране и зелених водоничних горива

Комплекс Колубарских копова заузима неколико хиљада хектара земљишта које је због ископавања угља и одлагања јаловине постало неплодно или је ниске пољопривредне вредности. У будућности би ово неплодно земљиште могло бити искоришћено за изградњу великих фотонапонских електрана. У предложеном решењу подразумева се фазни прелазак ТЕНТ-а на водонична горива и постепено смањење производње угља, тако да је у почетним фазама потребно водити рачуна да изградња фотонапонских електрана не ремети постојећу и планирану производњу угља. Тренутно расположива површина, приказана у Прилогу 1 на Слици А.1, износи приближно 1000 ха, што је више него довољно за изградњу предвиђене фотонапонске електране која би била изграђена у предложеној фази декарбонизације производње у постојећим блоковима А1 и А2. Пре почетка радова биће потребно извршити нивелацију терена и припрему површине ради постављања фотонапонских панела и носећих конструкција.

Планирана фотонапонска електрана подразумева укупну инсталисану снагу од 500 MWp. Панели би били постављени на земљи, начин конструкције „шатор”, као кров на две воде оријентисане исток–запад, а правац пружања редова панела север–југ. Нагиб панела ка истоку и западу био би 15 степени у односу на земљу. Прорачуни изведени коришћењем PVGIS алата показују да фотонапонско постројење инсталисане снаге 1 MWp, са наведеном конфигурацијом панела, може остварити просечну годишњу производњу од око 1044 MWh. На основу тога, планирана електрана, снаге 500 MWp, остваривала би приближно 522 GWh годишње производње. Оваква формација панела представља добро решење у погледу инвестиционих трошкова, инсталације и заузимања простора. Такође, временски профил производње овакве електране је повољнији у односу на јужно оријентисане панеле. Локације перспективне фотонапонске електране су удаљене око 25 km од ТЕНТ-а А, а њено прикључење би могло бити реализовано изградњом прикључне трансформаторске станице и прикључењем по принципу улаз–излаз на постојећи далековод 400 kV бр. 436, чија се траса налази у непосредној близини

копова, а који би директно повезивао перспективну соларну електрану са прикључним постројењем ТЕНТ-а А.

4.2 Развој система за производњу и локално складиштење зеленог водоника директно на локацији ТЕНТ А

Технологија која би омогућила производњу зеленог водоника, РЕМ електролизом, процењеном као најбоље решење, обухвата различите процесе организоване у јединствени систем, који би били усмерени ка електролизеру као главном елементу оваквог постројења. Процесе можемо категоризовати на следећи начин:

- снабдевање водом;
- електролизер;
- систем за складиштење водоника.

4.2.1 Снабдевање водом. ТЕНТ А располаже доступним воденим ресурсом из реке Саве, што омогућава ефикасно и стабилно снабдевање водом за потребе електролизе, при чему је специфична потрошња воде за РЕМ електролизу теоријски око 9 l/kg произведеног водоника, док у реалним условима рада, услед технолошких губитака и помоћних процеса, износи приближно 11–14 l/kg H₂. РЕМ електролизери захтевају воду високог степена чистоће, са специфичном електричном проводношћу мањом од 1 μS/cm, како би се спречила деградација мембране и продужио радни век система. Да би се обезбедио овај ниво квалитета, вода пролази кроз процес филтрације, затим реверзне осмозе, док се финално пречишћавање врши дејонизацијом помоћу јонских смола. Примена оваквог вишестепеног третмана омогућава добијање ултрачисте воде неопходне за несметан рад РЕМ ћелија.

Изградња система за електролизу у близини ТЕНТ-а А доноси значајну предност јер омогућава коришћење постојеће инфраструктуре. Конкретно, систем за филтрирање воде могао би се надоградити на већ постојећи, чиме би се оптимизовали трошкови и ресурси.

4.2.2 Електролизер. РЕМ електролизер (PEMel) представља централни део постројења за производњу водоника. Његова главна предност је релативно висока енергетска ефикасност при великој густини снаге, као и изражена флексибилност у раду, што га чини погодним за примену у системима са високим уделом обновљивих извора енергије.

За савремене индустријске РЕМ електролизере, енергетска ефикасност се, у зависности од изабране радне тачке, креће у опсегу од око 50% до 68%, рачунато у односу на доњу топлотну моћ водоника. Повећањем густине струје долази до пораста производног капацитета електролизера, али и до

Јелица Јанићијевић и остали: Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2 ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим изворима енергије

смањења ефикасности. Избор радног режима представља компромис између максималне производње водоника и укупне енергетске ефикасности система.

Флексибилност РЕМ електролизера огледа се у широком динамичком опсегу рада од 5% до 120% капацитета, [13]. Захваљујући веома брзом одзиву, са временом промене оптерећења (*ramp rate*) реда секунди, електролизер је у стању да се прилагоди променама улазне снаге без негативног утицаја на стабилност система. Време покретања из хладног стања (*cold start*) износи мање од 20 минута, што омогућава његову примену у условима изражене интермитентности и неуправљивости обновљивих извора енергије. Због својих добрих динамичких карактеристика, електролизери могу представљати значајан ресурс централизоване управљиве потрошње, која може бити регулациони ресурс за пружање услуге регулације активних снага у електроенергетском систему.

Производња водоника у оквиру разматраног пројекта директно би зависила од кретања цене електричне енергије на тржишту. Електролизери би били подешени да раде са максималним капацитетом у периодима када цена електричне енергије падне испод унапред дефинисаног прага, на пример испод 25% средње годишње цене. У интервалима када се цена електричне енергије креће између 25% и 150% средње годишње вредности, електролизери би били пуштани у рад са смањеним оптерећењем, и то искључиво у случајевима када производња електричне енергије из соларних електрана не може бити евакуисана у систем због потенцијалних оперативних ограничења у преносној мрежи.

У почетној фази пројекта предвиђена је изградња РЕМ електролизера инсталисане снаге 400 MW, који би делимично обезбеђивао потребну количину гасовитог горива за гасну електрану планирану као замену за агрегате А1 и А2 у ТЕНТ-у А. При наведеној инсталисаној снази, очекивана производња водоника износи до приближно 8.000 kg/h, у зависности од изабраног режима рада и енергетске ефикасности система.

Процењени радни век савремених РЕМ електролизера износи око 60.000 до 80.000 радних сати. Током експлоатације долази до постепене деградације перформанси система, која се најчешће испољава кроз пораст радног напона и смањење енергетске ефикасности, са типичним стопама деградације у опсегу од 0,5% до 2,5% годишње, [20]. Наведени параметри имају значајан утицај на дугорочну економску оправданост пројекта и морају бити узети у обзир при планирању експлоатације постројења.

За постављање електролизерског постројења потребна је површина од око 8 ha, при чему је пожељно да се локација налази у непосредној близини термоелектране, ради смањења инфраструктурних трошкова и лакше интеграције у постојећи енергетски

систем. Као најповољније решење разматра се коришћење дела постојећег пепелишта. Поред производње водоника, у будућности се оставља могућност доградње система за складиштење кисеоника, уколико се на тржишту појави потреба за већим количинама овог гаса, чиме би се додатно повећала укупна искоришћеност постројења и економска добит пројекта. У Прилогу 1 на слици А.2. налази се пример диспозиције опреме у једном таквом постројењу.

4.2.3 Складиштење водоника. Оно представља посебан изазов. Како је већ речено, због изузетно мале запреминске густине енергије водоника на атмосферском притиску, као и тежње за што је могуће запремински мањим складиштима, неопходно је изложити га високом притиску (и до 800 бара). Водоник као елемент са најмањом атомском масом има тенденцију да пролази кроз материјал и чини га крхким, те би такво цурење водоника представљало још један од проблема при изградњи складишта. Међутим, предност оваквог складиштења јесте брза и лака употреба и релативно једноставна инфраструктура с обзиром на то да компресори и резервоари већ постоје за индустријске намене, а проблем цурења очекујемо да ће се решити даљим истраживањем и брзим напретком технологије.

У овој анализи претпостављено је да се складишта водоника димензионишу према дневним или недељним потребама, док се дугорочно складиште планира кроз производњу амонијака. При производњи и компресији водоника ослобађа се значајна топлота, па је у оквиру енергетског комплекса предвиђено и складиштење топлоте. На Слици 4 приказан је потенцијални простор на којем би био изграђен енергетски комплекс за производњу и складиштење водоника, као и инфраструктура јамског топлотног складишта. Посматрана локација налази се на делу одлагалишта пепела. Пре свега за било какву градњу на пепелиштима неопходно је да се на локацији престане са одлагањем пепела, да се одлагалиште стабилизује и да се сачека са изградњом док се не заустави интензивно слегање тла. С обзиром на то да постоје делови одлагалишта пепела чије су касете затворене већ дужи низ година, може се сматрати да и у постојећим условима постоје површине које могу бити искоришћене за предложену намену. Назначена површина има 60 ha и довољна је за инсталацију свих инфраструктурних елемената комплекса. У том погледу потребна је реорганизација постојећих планова коришћења пепелишта за друге сврхе. Овај простор је вишеструко погодан за инсталацију, како система за производњу и складиштење водоника тако и за јамско топлотно складиште. Неке од кључних предности овог простора су:

- локација је у непосредној близини ТЕНТ-а А, на удаљености од свега 700 m, тако да представља део комплекса термоелектране и може се једноставно доградити електроенергетска,

термоенергетска и путна инфраструктура за функционалност свих елемената система;

- локација је у непосредној близини реке Саве, што омогућава једноставну инсталацију система топлотних пумпи за тоplotно складиште, као и система за обезбеђивање воде за процес електролизе;
- не узурпира се простор који има пољопривредну вредност и не очекују се негативни утицаји на микрооколину јер се ради о неплодном вештачком брегу;
- терен је издигнут изнад околине за око 30 m, тако да је заштићен од поплава, као и од присуства подземних вода које су врло неповољне за изградњу топлотног складишта; у том контексту потребно је извршити планирање коришћења активних пепелишта на начин да не угрожавају тоplotно складиште;
- сув пепео је квалитетан тоplotни изолатор и може обезбедити добру ефикасност складиштења топлоте;
- терен погодује изградњи подземних резервоара за складиштење водоника;
- електролизер и агрегати у ТЕНТ-у А налазе се на блиском растојању са овде планираним тоplotним складиштем, тако да је изградња инфраструктуре за складиштење отпадне топлоте која се добија у овим процесима јефтина и ефикасна.



Слика 4. Предлог простора за изградњу енергетског комплекса за производњу и складиштење водоника и јамског тоplotног складишта на локацији ТЕНТ А

4.3 Развој система за синтезу амонијака и локално сезонско складиштење

У случајевима када је складиште водоника попуњено, а постоје услови и могућност даље производње, вишак водоника би се користио за производњу амонијака. Амонијак би се дугорочно складиштио и користио превасходно у зимском периоду, када је производња електричне енергије из

фотонапонских електрана смањена, а цене електричне енергије на тржишту повећане, чиме би се омогућило сезонско билансирање електроенергетског система.

Производња амонијака вршила би се комбиновањем водоника и азота добијеног из ваздуха применом Хабер–Бошовог процеса, при температурама од 400–500°C, притисцима од 100–200 bar и употреби гвоздених катализатора, што је приказано у Прилогу 1 на слици А.3.

Инфраструктура за синтезу и складиштење амонијака била би инсталирана на локацији складишта водоника, ради рационалног коришћења простора и постојеће инфраструктуре. Азот, као друга неопходна компонента процеса, добијао би се издвајањем из ваздуха применом криогене јединице за раздвајање ваздуха (ASU – *Air Separation Unit*), која представља најпогодније решење за производњу великих количина азота високе чистоће. Систем ASU користио би стабилно напајање електричном енергијом из мреже и састојао би се од компресорских јединица, система за размену топлоте и дестилационих колона за раздвајање гасних компоненти.

Након припреме, водоник и азот уводили би се у синтезну петљу (*synloop*), чије главне компоненте чине компресори, измењивачи топлоте и реактори за синтезу амонијака. Као крајњи производ добијао би се течни амонијак (*Liquid ammonia*, LNH_3). Отпадна топлота настала током процеса синтезе делимично би се користила за потребе самог процеса, док би се преостали део могао складиштити у предвиђеном тоplotном складишту, чиме би се додатно повећала укупна енергетска ефикасност система.

Складиштење амонијака захтева посебан приступ због његове токсичности и способности да изазове напонску корозију у угљеничним челицима. У енергетским постројењима примењују се три основна метода складиштења амонијака: складиштење под притиском у челичним резервоарима, расхлађено складиштење при атмосферском притиску и ниским температурама, као и комбиновани системи који користе умерене вредности температуре и притиска. За складиштење великих количина амонијака, расхлађено складиштење представља најповољнију опцију, јер у случају оштећења резервоара испуштање амонијака протиче спорије него код складиштења под високим притиском.

Један од значајних изазова при коришћењу амонијака у енергетским системима јесте емисија азотних оксида (NO_x), нарочито при сагоревању на високим температурама и притисцима у гасним турбинама. За смањење NO_x емисија као најефикаснија мера примењује се селективна каталитичка редукција (SCR – *Selective Catalytic Reduction*), која користи катализаторе и редукциони агенс, најчешће амонијак или уреу, ради претварања азотних оксида у азот и водену пару. Ова технологија је компатибилна са савременим гаснотурбинским

Јелица Јанићијевић и остали: Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2 ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим изворима енергије

постројењима и већ се примењује у термоелектранама. Упркос примени система за смањење емисија NO_x , директно сагоревање амонијака у гасним турбинама и даље представља технолошки изазов услед његових неповољних карактеристика сагоревања. Због тога сматрамо да је боље амонијак не користити директно као гориво, већ као носач водоника. У овом концепту, зелени амонијак се у посебном постројењу за разлагање (*ammonia cracking*) разлаже на водоник и азот, при чему се добијени водоник користи у гасним турбинама. Овај приступ омогућава смањење емисија NO_x и примену технолошки зрелијих гаснотурбинских решења, док директно сагоревање амонијака остаје перспектива дугорочног развоја.

4.4 Изградња гаснотурбинских постројења на месту постојећих термоенергетских блокова

Постојећи блокови А1 и А2 били би замењени гаснотурбинским постројењима. Уместо котловских постројења и парних турбина које користе угљ, на истим локацијама могу се инсталирати гаснотурбинске јединице које ће у почетним фазама користити мешавину природног гаса и водоника, а дугорочно прећи на потпуно сагоревање зеленог водоника и амонијака, када оваква постројења буду технолошки сазрела и економски приступачна. Поред просторног аспекта, битно је истаћи да нове гаснотурбинске јединице могу искористити постојећу прикључну опрему, као што су блок-трансформатори и расклопна опрема. Стање генератора у овим блоковима је потребно проверити, али се сугерише уградња нових јединица.

Гаснотурбинско постројење састоји се од три целине: вишестепена компресија са међухлађењем, комора за сагоревање и експанзионе турбине. Ефикасност претварања горива у електричну енергију зависи од радне температуре турбине. Што су температуре више, већа је ефикасност, што значи економичнији рад. Продукти сагоревања у типичној гасној турбини могу достићи температуру од 1260°C , али критични метали у турбини могу издржати само $815\text{--}926^\circ\text{C}$. Зато се користи ваздух из компресора за хлађење кључних компоненти турбине, што смањује крајњу термичку ефикасност. Захваљујући иновативним технологијама хлађења и напредним материјалима отпорним на високе температуре, модерне гасне турбине сада постижу улазне температуре до 1427°C , што је за 167°C више него код претходних турбина.

Још један начин за повећање ефикасности је инсталација рекуператора или парног генератора за искоришћење отпадне топлоте (HRSG – *Heat Recovery Steam Generator*), који омогућавају поврат енергије из издувних гасова турбине. Рекуператор сакупља отпадну топлоту из издувног система турбине и користи је за предгревање ваздуха из компресора пре него што уђе у комору за сагоревање. Парни

генератор за искоришћење отпадне топлоте (HRSG) користи издувну топлоту гасне турбине за генерисање паре. Ови котлови су такође познати као парни генератори за рекулацију топлоте. Пара високог притиска из ових котлова може се користити за производњу додатне електричне енергије помоћу парних турбина, чиме настаје конфигурација позната као комбиновани циклус. Једноставни циклус гасне турбине може постићи степен конверзије енергије у распону од 20% до 35%. Очекује се да ће будуће гасне турбине које користе водоник у комбинованом циклусу достићи ефикасност од 60% или више. Ако се отпадна топлота из ових система искористи за напајање предвиђеног топлотног складишта, укупна ефикасност енергетског циклуса могла би да достигне и 80%.

У овој анализи претпостављено је да се гасовито гориво сагорева у присуству ваздуха и аргона (који се користи као инертни гас) како би се смањила излазна температура. Главни производи сагоревања су азот (N_2) и вода (H_2O). С обзиром на то да је укупна инсталисана снага агрегата А1 и А2 око 400 MW, да би се искористила одређена инфраструктура и обезбедили исти услови пласмана енергије у преносну мрежу, гасна турбина ће такође бити снаге 400 MW. Међутим, као алтернативно решење, уместо једног гаснотурбинског агрегата велике снаге, могуће је размотрити и инсталацију два или три гаснотурбинска агрегата мање појединачне снаге, што може допринети већој флексибилности рада, поузданијем погону и лакшем одржавању система.

4.5 Развој система за складиштење отпадне топлотне енергије у сврху грејања

Ефикасно искоришћење отпадне топлотне енергије из енергетских постројења представља кључни корак ка повећању енергетске ефикасности и смањењу укупних губитака система. Део отпадне топлоте генерише електролизер, а део електрана. Гаснотурбинске електране, које користе мешавину природног гаса и водоника или чисти водоник, генеришу значајну количину отпадне топлоте током процеса сагоревања. Ова енергија може се усмерити на системе даљинског грејања, индустријске процесе или складиштење у термалним акумулаторима за каснију употребу.

У овој анализи предложено је коришћење топлотних акумулатора са воденим површинским јамским резервоарима, где вода као медијум за складиштење топлоте омогућава лако пребацивање енергије у системе даљинског грејања.

С обзиром на то да је ТЕНТ А у близини урбаног подручја, где постоји развијен систем даљинског грејања, отпадна топлота из електране може се директно користити за загревање воде у јамском складишту топлоте које би касније било коришћено за загревање воде у топловодној мрежи. На овај начин смањује се потреба за сагоревањем додатних горива,

чиме се доприноси смањењу емисија гасова са ефектом стаклене баште и повећава укупна енергетска ефикасност система. Посебну предност оваквом концепту даје топловодни систем који је планиран за изградњу између Београда и ТЕНТ-а А, који би омогућавао да се топлотно складиште укључи у систем грејања Београда.

Увођењем система за коришћење отпадне топлоте, укупна ефикасност гаснотурбинских постројења може се повећати са стандардних 55-60% на преко 80%, смањујући истовремено трошкове грејања и повећавајући исплативост енергетских објеката. Поред тога, употреба складиштене топлоте у индустрији или даљинским системима грејања смањује потребу за додатним енергетским ресурсима и доприноси развоју одрживих решења у енергетском сектору.

5. СИМУЛАЦИЈА ЕНЕРГЕТСКИХ ТОКОВА У ПРЕДЛОЖЕНОМ КОМПЛЕКСУ

У циљу детаљније анализе енергетских перформанси предложеног система, спроведена је симулација токова енергије кроз његове главне компоненте. Симулација омогућава увид у расподелу и ефикасност употребе енергије, идентификацију потенцијалних губитака, као и оцену укупне енергетске ефикасности система.

Као што је већ речено, електролизери би радили у периоду ниских цена. У овој анализи је претпостављено да је праг ниских цена при којем ће доћи до укључења електролизера 25% средње годишње цене. На графику на Слици А.4 из Прилога овај праг је назначен зеленом линијом. Гасне турбине би биле у погону у периодима када цена електричне енергије на референтној берзи прелази 150% средње годишње цене, тј. када је цена изнад црвене линије на графику на Слици 6. Таквим системом рада, а на основу сатне цене електричне енергије [eur/MWh] на берзи HUPX у току 2024. године, добијен је број радних сати за оба система и граничне цене, што се може видети у Прилогу 1 на Слици А.4, као и у Табели II.

У овој анализи претпостављено је да је у енергетском комплексу у првој фази инсталиран електролизер снаге 400 MW. Произведени водоник ће подмиривати део потреба за рад гасне турбине, а остатак ће бити природни гас. Таквим PEM електролизером и временом рада по поменутом принципу, на годишњем нивоу се искористи око 340 GWh електричне енергије, а количина произведеног водоника износи око 6140 t, што чини нешто мање од 50% потребне количине за потпуну супституцију умешаног горива чистим водоником. Губици енергије су неизбежан негативан фактор, па тако долази и до губитака у систему пре самог процеса електролизе, реда величине неколико

процената, најчешће у опсегу од око 5% до 10%, [21]. Затим следи процес PEM електролизе, који се одвија са ефикасношћу од око 65%, док је остатак отпадна топлота чији део енергије можемо да искористимо за загревање воде у топлотном складишту. Овим би се намирила половина потребне енергије за рад гасних турбина, док би се остатак добијао из природног гаса. Пошто је енергетска вредност природног гаса (LHV – *lower heating value*) 13,894 kWh/kg, лако можемо добити количину гаса која је потребна за рад гасне турбине и она на годишњем нивоу износи 15.718 t. Масени удео водоника при умешавању износи 28%. Добијене количине енергената, њихова енергетска вредност, као и удео умешавања, налазе се у табелама III и IV.

Ефикасност система гасних турбина који поседује и парне турбине је око 60%; сходно томе, добија се коначна расположива електрична енергија од око 254 GWh.

Табела II Број радних сати електролизера и гасних турбина

Средња годишња цена електричне енергије (HUPX-2024) [eur/MWh]	100,81
Цена електричне енергије на прагу за укључење PEMel (производња водоника) [eur/MWh]	25,20
Цена електричне енергије на прагу гаснотурбинских постројења (потрошња водоника) [eur/MWh]	151,22
Број сати рада PEMel са максималним капацитетима (цена испод 25%)	785,00
Број сати рада гасних турбина (цена већа од 150%)	1.058,00

Табела III Потребна количина енергената и њихова енергетска вредност

Инсталисана снага гасних турбина [MW]	400,00
Инсталисана снага електролизера [MW]	400,00
Специфична потрошња система [kWh/kg-H ₂]	55,30
Специфична потрошња електролизера [kWh/kg-H ₂]	51,10
Енергетски садржај водоника – LHV [kWh/kg]	33,33
Енергетски садржај метана – LHV [kWh/kg]	13,89
Ефикасност гасне турбине	40%
Додатна искоришћеност преко HRSG-а и парне турбине	20%
Укупна ефикасност постројења (комбиновани циклус)	60%
Ефикасност електролизера	65%
Потребна количина природног гаса за гасне турбине (100% метан) [t]	30.459,19
Потребна количина водоника за гасне турбине (100% водоник) [t]	12.697,27
Произведена количина водоника (мешовито гориво) [t]	6.144,81
Потребна количина природног гаса за гасне турбине (мешовито гориво) [t]	15.718,54

Јелица Јанићијевић и остали: Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2 ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим изворима енергије

Табела IV Енергетска вредност енергената

Енергија садржана у укупно произведеној количини водоника [GWh]	204,81
Енергија садржана у природном гасу [GWh]	218,39
Добијена енергија из гасних турбина [GWh]	253,92
Енергетски проценат водоника	48%
Енергетски проценат гаса	52%
Проценат умешавања водоника (масени)	28%

При свом радном циклусу и гасна турбина и електролизер поседују губитке у виду отпадне топлоте. Део ове топлоте, који се јавља на погодном температурном нивоу, може бити технички искоришћен и ускладиштен у топлотне акумулаторе. Овакво складиштење топлотне енергије пре свега је намењено краткорочном, односно непосредном коришћењу, услед постојања неизбежних топлотних губитака у акумулационим системима. За потребе оквирне процене усваја се удео технички искористиве отпадне топлоте од 14–15% у односу на електричну енергију доведену директно у стек РЕМ електролизера, [22]. Располагаива количина енергије која се може складиштити у виду топлоте приказана је у Табели V.

Табела V Отпадна топлота

Енергија која се може искористити у виду топлоте (ослобођена при процесу електролизе) [GWh/TJ]	47,10	169,56
Енергија која се може искористити у виду топлоте (ослобођена при раду турбине) [GWh/TJ]	84,64	304,70
Укупна енергија која се може складиштити у виду топлоте [GWh/TJ]	131,74	474,26

Када поново сумирамо цео један енергетски циклус на годишњем нивоу, почевши од уложене електричне енергије у производњу водоника као енергетског носиоца, па до поновно произведене електричне енергије уз помоћ гасних турбина, можемо добити ефикасност таквог процеса. Енергетски ток и ефикасност годишњег циклуса су приказани у Табели VI. Приказана ефикасност циклуса са искоришћењем топлоте односи се на случај делимичног коришћења отпадне топлоте гасне турбине и електролизера путем топлотних акумулатора.

Према задатим претпоставкама, производња електричне енергије у гаснотурбинским постројењима ће се вршити у периодима врло високих цена на берзи електричне енергије, тако да ће произведени MWh у овим постројењима имати високу тржишну вредност. У Табели VII дати су подаци о бруто годишњим приходима анализираниог постројења.

Треба напоменути да приликом процене бруто годишњег прихода нису обухваћени годишњи трошкови одржавања, које је за сада тешко проценити. За исплативост предложеног пројекта потребно је располагати подацима о инвестицијама у

опрему и изградњу система. Технологије за производњу, складиштење и коришћење водоника се интензивно развијају, при чему су комерцијално доступна решења ограничена, а њихова примена још увек није широко заступљена. Из тог разлога, актуелна истраживања првенствено су усмерена на унапређење енергетске ефикасности ових система и оптимизацију процеса конверзије енергије. Свеобухватна економска оправданост изградње система заснованих на водонику моћи ће се реалније сагледати у наредном периоду, када технологије достигну виши степен комерцијалне зрелости, уз очекивано смањење инвестиционих трошкова и повећање ефикасности.

Табела VI Ефикасност циклуса

Енергија уложена у PEMel систем (урачунати су и губици система) [GWh]	339,81
Део енергије PEMel уложена у рад електролизера [GWh]	314,00
Енергија садржана у укупно произведеном водонику [GWh]	204,81
Енергија садржана у укупно потребном природном гасу [GWh]	218,39
Добијена енергија из гасних турбина [GWh]	253,92
Укупна енергија која се може складиштити у виду топлоте [GWh]	131,74
Ефикасност циклуса без искоришћења топлотне енергије	45%
Ефикасност циклуса (са краткорочним чувањем топлоте)	69%

Табела VII Бруто годишњи приход

Просечна цена електричне енергије (испод прага 25% средње год.) [eur/MWh]	0,71
Просечна цена електричне енергије (изнад прага 150% средње год.) [eur/MWh]	254,62
Просечна цена гаса [eur/MWh]	45,00
Цена купљеног гаса [eur]	9.827.700,59
Цена купљене ел. енергије за производњу водоника [eur]	242.428,27
Цена продате енергије произведене из водоника [eur]	64.652.690,40
Бруто годишњи приход [eur]	54.582.561,54

6. ЗАКЉУЧАК

У овом раду анализирано је идејно решење преласка термоенергетских блокова А1 и А2 у ТЕНТ-у А са фосилних горива на гаснотурбинске системе са водоником као примарним горивом. Разматрани су технолошки трендови у производњи и складиштењу зеленог водоника, као и интеграција обновљивих извора енергије у циљу декарбонизације електроенергетског сектора.

Један од кључних изазова у овом процесу јесте ефикасност конверзије електричне енергије у водоник путем електролизе, као и губици приликом сагоревања у гасним турбинама. Анализирани су показатељи ефикасности ових процеса, при чему се показало да постоје значајни енергетски губици, али и

да развој нових технологија може допринети оптимизацији целокупног система.

Такође, посебна пажња посвећена је складиштењу водоника и његових деривата, попут амонијака, као потенцијалних решења за сезонско балансирање енергетског система. Поред тога, разматрана је могућност коришћења отпадне топлотне енергије за грејање, чиме би се додатно побољшала енергетска ефикасност енергетског комплекса.

Предложено решење обухвата изградњу фотонапонске електране инсталисане снаге фотонапонских панела од 500 MWp на деловима угљенокопа „Колубара”, која би годишње произвела око 522 GWh електричне енергије. Производња водоника би се одвијала у периодима ниске цене електричне енергије на регионалном тржишту. На основу података са берзе HUPX прорачунати су трошкови производње водоника, као и приходи који се могу остварити радом гаснотурбинског постројења. Закључено је да годишњи бруто приход може бити и преко 50 милиона евра.

Генерално, резултати рада указују на то да је транзиција термоелектрана на угљ у гаснотурбинска постројења на водоник технички изводива, али тренутно веома скупа и захтева даља улагања у истраживање и развој, како би се повећала ефикасност целокупног ланца производње, складиштења и конверзије енергије. Ипак, овакав процес може бити актуелан и спроведен тако да се у првој фази изградње производна гаснотурбинска постројења која би радила на природни гас, а да се са развојем водоничних технологија врши постепено увођење водоника кроз умешавање. Дакле, потребно је систем планирати и технолошки опремити тако да може радити са било којим степеном умешавања водоника укључујући и чисти водоник. Овај приступ би омогућио да се истом технологијом изврши транзиција што би допринело стабилности електроенергетског система и постепеној декарбонизацији производње електричне енергије у ЕЕС-у Србије.

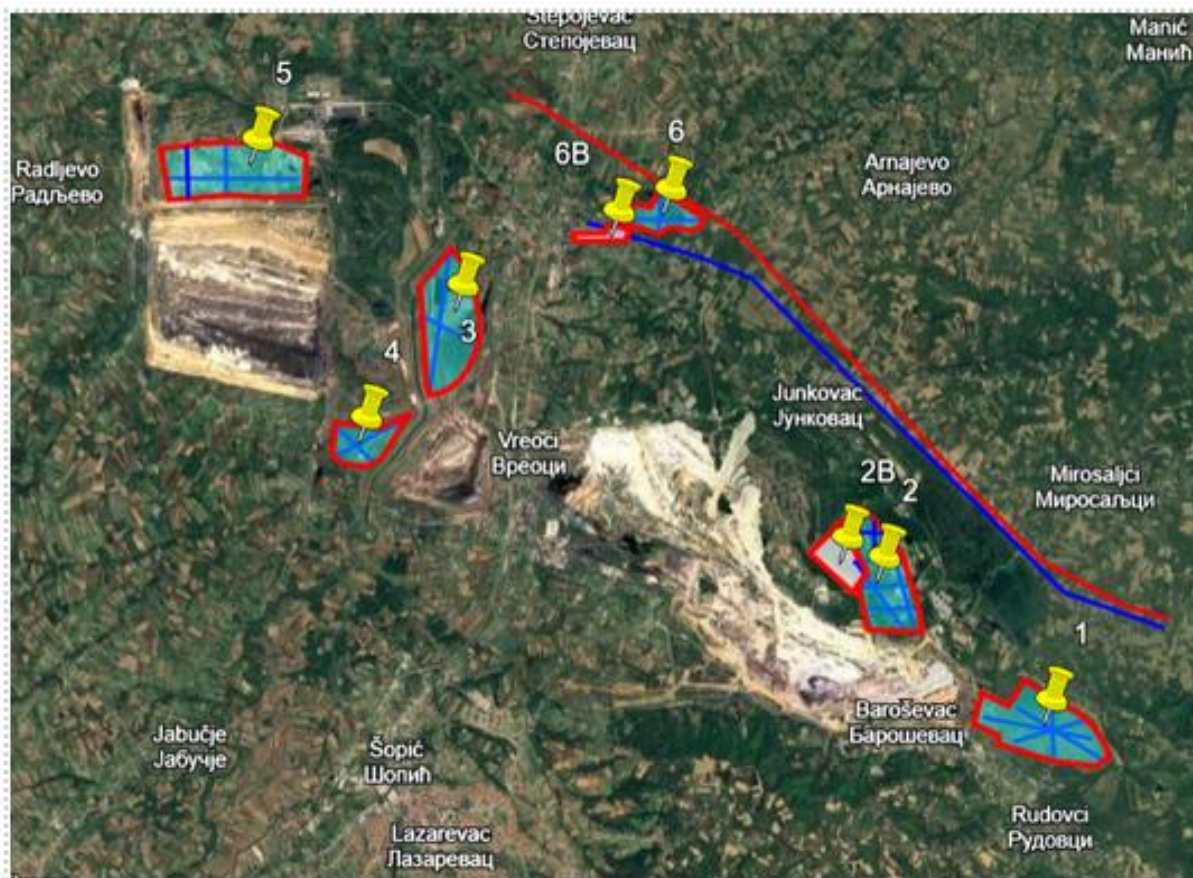
Поред тога, овај приступ иде на страну јачања енергетске независности Србије јер би у крајњем исходу сва енергија за производњу водоника била произведена из фотонапонских и ветроелектрана на територији Србије. Овај приступ би омогућио и декарбонизацију дела термоенергетског сектора, што би битно допринело решавању проблема лошег квалитета ваздуха. Предложено решење захтева минималну концептуалну промену и изградњу недостајуће инфраструктуре у преносној мрежи, јер подразумева коришћење већ постојећег енергетског чворишта, што би битно смањило трошкове у погледу интеграције обновљивих извора у ЕЕС.

ЛИТЕРАТУРА

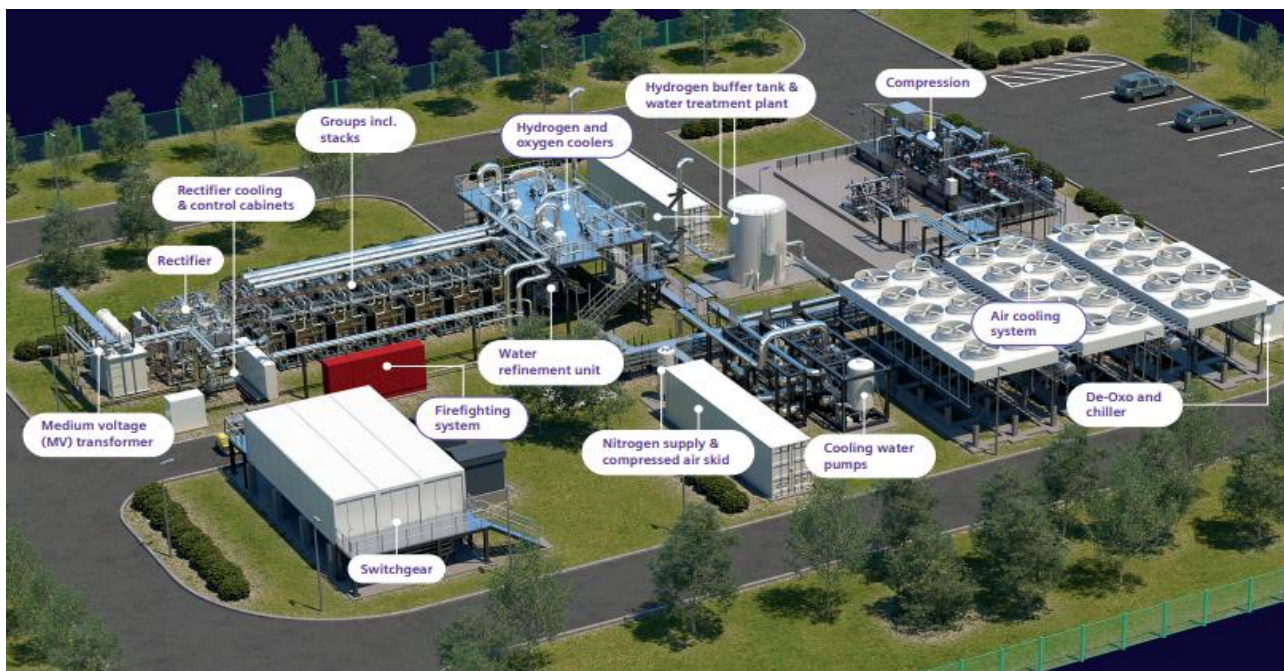
- [1] „H2RES – Green Hydrogen Production” [Internet]. [цитирано 28. 3. 2026]. Доступно на: <https://stateofgreen.com/en/solutions/h2res-green-hydrogen-production/>
- [2] „Share of green hydrogen in Vienna cogeneration plant reaches 15%” [Internet]. [цитирано 28. 3. 2026]. Доступно на: <https://balkangreenenergynews.com/share-of-green-hydrogen-in-vienna-cogeneration-plant-reaches-15/>
- [3] Alstom, „Coradia iLint – World’s first hydrogen-powered passenger train” [Internet]. [цитирано 28. 3. 2026]. Доступно на: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-passenger-train>
- [4] „Hydrogen Economy Roadmap of Korea” [Internet]. [цитирано 28. 3. 2026]. Доступно на: https://h2council.com.au/wp-content/uploads/2022/10/KOR-Hydrogen-Economy-Roadmap-of-Korea_REV-Jan19.pdf
- [5] Yara International, „Yara opens renewable hydrogen plant – a major milestone” [Internet]. [цитирано 28. 3. 2026]. Доступно на: <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-opens-renewable-hydrogen-plant-a-major-milestone/>
- [6] „Dubai’s production of green hydrogen generates over 1 GWh of energy...” [Internet]. [цитирано 28. 3. 2026]. Доступно на: <https://hydrogen-central.com/dubais-production-of-green-hydrogen-generates-over-1-gwh-of-energy-and-reduces-about-450-tonnes-of-co2-emissions/>
- [7] U.S. Department of Energy, „Hydrogen Fuel Basics” [Internet]. [цитирано 28. 3. 2026]. Доступно на: energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics
- [8] S. H. Osman, N. S. M. Yatim, O. S. J. Elham, N. Shaari, Z. Zakaria, „Three decades of hydrogen energy research: A bibliometric analysis on the evolution of green hydrogen technologies”, *Sustainable Energy & Fuels*, Vol. 9, pp. 3182, 2025, DOI: 10.1039/d5se00254k.
- [9] M. M. Hossain, B. Zahed Siddique, „Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 102, pp. 1026–1044, Feb. 2025.
- [10] International Renewable Energy Agency, *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*, IRENA, 2020.
- [11] International Energy Agency, *Global Hydrogen Review 2024*, IEA, Sept. 2024.
- [12] V. A. Martinez Lopez, H. Ziar, J. W. Haverkort, M. Zeman, O. Isabella, „Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems integration”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 182, Article 113407, 2023, DOI: 10.1016/j.rser.2023.113407.

- [13] International Renewable Energy Agency, *Green Hydrogen Cost Reduction*, IRENA, 2020.
- [14] Andersson, J., Grönkvist, S., „Large-scale storage of hydrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 23, pp. 11901–11919, 2019, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063.
- [15] M. Aziz, A. T. Wijayanta, A. B. D. Nandiyanto, „Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization”, *Energies*, Vol. 13, No. 12, Article 3062, 2020, DOI: 10.3390/en13123062.
- [16] C. Smith, A. K. Hill, L. Torrente-Murciano, „Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape”, *Energy & Environmental Science*, Vol. 13, pp. 331–344, 2020, DOI: 10.1039/C9EE02873K.
- [17] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W. I. F. David, P. J. Bowen, „Ammonia for power”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 69, pp. 63–102, 2018, DOI: 10.1016/j.pecs.2018.07.001.
- [18] Hirscher, M., Yartys, V. A., Baricco, M., et al., „Materials for hydrogen-based energy storage – past, recent progress and future outlook”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 827, Article 153548, 2020, DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153548.
- [19] Pashchenko, D., „Hydrogen-rich gas as a fuel for the gas turbines: A pathway to lower CO₂ emission”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 173, Article 113117, 2023, DOI: 10.1016/j.rser.2022.113117.
- [20] „Technical targets for proton exchange membrane electrolysis” [Internet]. [цитирано 28.03.2026]. Доступно на: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/technical-targets-proton-exchange-membrane-electrolysis>
- [21] „Hydrogen electrolyzers – bridging the gap between manufacturer claims and real-world performance”, [Internet]. [цитирано 28. 3. 2026]. Доступно на: <https://www.h2cluster.rs/en/hydrogen-electrolyzers-bridging-the-gap-between-manufacturer-claims-and-real-world-performance/>
- [22] E. van der Roest, R. Bol, T. Fens, A. van Wijk, „Utilisation of waste heat from PEM electrolyzers”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023
- [23] Siemens Energy, „Hydrogen Solutions” [Internet]. [цитирано 28. 3. 2026]. Доступно на: <https://www.siemensenergy.com/global/en/home/productsservices/productofferings/hydrogensolutions.html>
- [24] Pawar, N. D., Heinrichs, H. U., Winkler, C., et al., „Potential of green ammonia production in India”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 52, pp. 27247–27267, 2021, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.180.

ДОДАТАК (ПРИЛОГ) 1

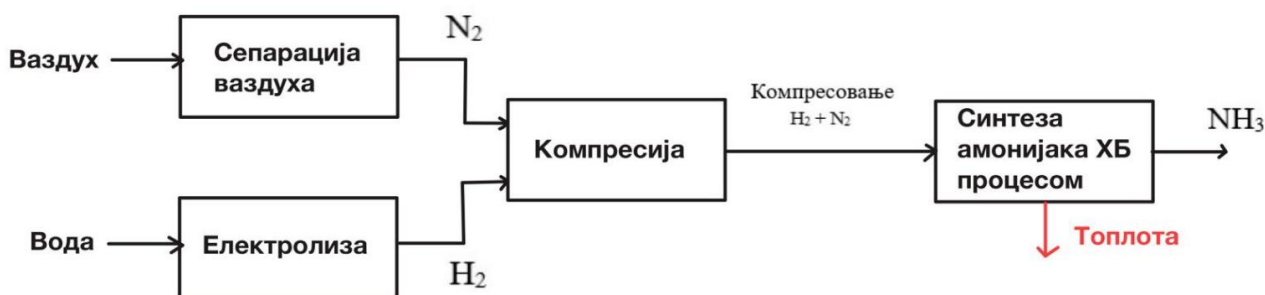


Слика А.1. Тренутно расположиве површине на којима се може планирати изградња фотонапонске електране на угљенокопу „Колубара”

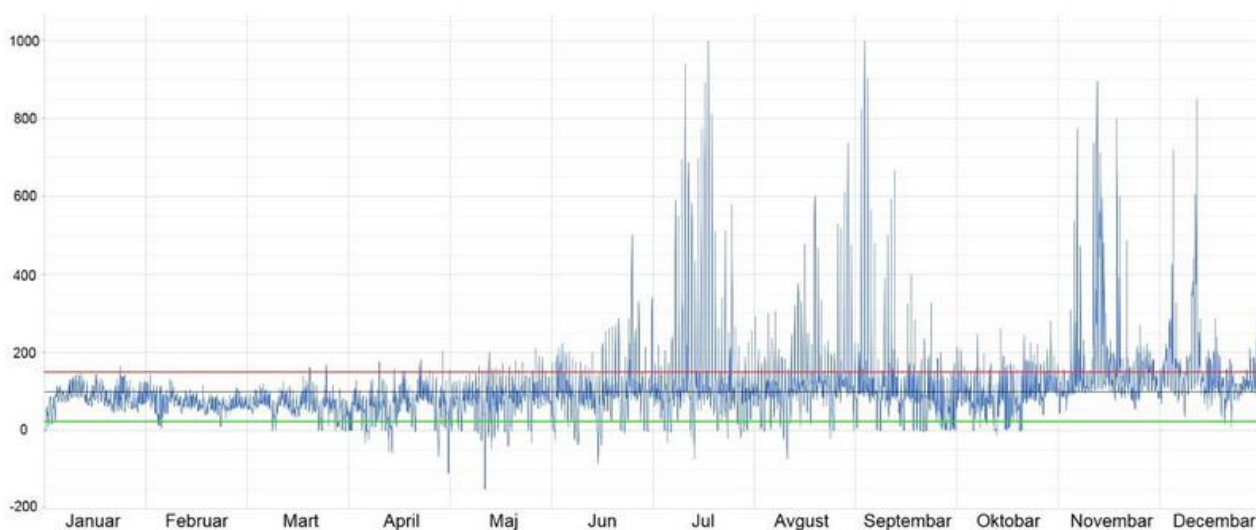


Слика А.2. Диспозиција опреме у систему за производњу водоника, [23]

Јелица Јанићијевић и остали: Идејно решење супституције угља као горива у блоковима А1 и А2 ТЕ „Никола Тесла” применом водоничних технологија са обновљивим изворима енергије



Слика А.3. Принципска шема производње амонијака Хабер-Бошовим процесом, [24]



Слика А.4. Графички приказ цена електричне енергије на берзи HUPX за годину 2024. са назначеним границама у односу на које се погоне електролизери и гасне турбине

БИОГРАФИЈЕ



Јелица Јанићијевић је рођена 2003. године у Београду, Република Србија. Завршила је 7. и 8. разред основне школе и средњу школу у специјалном, менторском одељењу у Математичкој гимназији. Тренутно је студент четврте године основних академских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Енергетика.

Током основног и средњег образовања учествовала је и освајала награде на државним такмичењима из физике и математике, а била је и члан Истраживачке станице Петница. У току студија учествовала је у пројектима пројектовања више електроенергетских трафостаница. Аутор је

студентског стручног рада који је изложен на саветовању CIGRE Србија 2025, где је награђен као најзапаженији студентски рад. Аутор је и рада излаганог на саветовању CIRED Црна Гора 2026, који је такође награђен као најзапаженији рад у својој сесији. Добитница је награде Фондације „Гордана Јокић Кашиковић и Драгиша Кашиковић” за најбољи студентски рад 2025. године. Добитница је стипендије Министарства просвете Републике Србије за надарене студенте. Такође, додељено јој је признање „Електромреже Србије” у виду стипендије као резултат високих академских постигнућа. За остварен изузетан успех током студија награђена је и признањем за најбољег студента на смеру Енергетика у трећој и четвртој години студија.

ORCID: 0009-0002-6205-5587



Данило Влаховић је рођен 2003. године у Вршцу, Република Србија. Основну школу „Јован Стерија Поповић” завршио је као ученик генерације, а средњошколско образовање стекао је у Гимназији „Борислав Петров Браца” у Вршцу. Тренутно је студент четврте године основних академских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на смеру Енергетика.

Добитник је стипендије Министарства просвете Републике Србије за изузетно надарене ученике и студенте, стипендије „Електромере Србије”, такође је и стипендиста Фондације „Студеница”. Током школовања остварио је запажене резултате на државним такмичењима из математике и физике, укључујући прву награду на Републичком такмичењу из физике и пласман на Српску физичку олимпијаду. Учествовао је и на међународном екипном такмичењу из физике FYKOS.

У оквиру пројектних активности израдио је рад „Акустични левитатор”, награђен другим местом на Републичком такмичењу, као и студентски рад изложен на саветовању CIGRE Србија 2025, који је награђен као најзапаженији студентски рад. Поменути рад је награђен и од Фондације „Гордана Јокић Кашиковић и Драгиша Кашиковић” за најбољи студентски рад 2025. године. Аутор је и рада излаганог на саветовању CIREД Црна Гора 2026, који је такође награђен као најзапаженији рад у својој сесији. Његова главна интересовања обухватају обновљиве изворе енергије, водоник, електроенергетске системе, енергетску транзицију и складиштење енергије.

ORCID: 0009-0007-9784-9084



Александар Латинић је рођен 1986. године у Бихаћу, Босна и Херцеговина. Основну школу завршио је у Лазареву, селу наомак Зрењанина, а потом Зрењанинску гимназију. Дипломске и мастер студије завршио је на Електротехничком факултету у Београду, Одсек енергетика. Од 2010. године до 2025. године као запослени ЕПС АД радио је на пословима који се тичу помоћних услуга, системских софтвера за управљање процесима производње и одржавања, SCADA система, а радио је на развоју и изградњи ОИЕ пројеката. Члан је CIGRE комитета C2. Био је члан више радних група МРЕ које су радиле на изради и усаглашавању техничке и законске регулативе која је имала циљ интеграцију ОИЕ у ЕЕС Републике Србије. Од 2025. године је самостални консултант са експертизом у техничким аспектима балансирања система.

ORCID: 0009-0000-0194-4618



Жељко Р. Ђуришић је рођен 1972. године у селу Бабино, Беране, Црна Гора. Основну школу је завршио у родном селу, а средњу електротехничку школу у Беранама. Дипломске, мастер и докторске студије је завршио на Електротехничком факултету у Београду, на смеру Електроенергетски системи, Од 2001. године запослен је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, где је прошао сва сарадничка и наставничка звања, а од 2023. године је у звању редовног професора. Руководилац је Лабораторије за електране. Његов научни рад је доминантно усмерен ка планирању, интеграцији и експлоатацији обновљивих извора енергије у електроенергетским системима. Коаутор је четири уџбеника и око 300 научно-стручних радова, од којих је 40 публиковано у међународним часописима са SCI листе. Био је ментор при изради седам докторских дисертација и око 300 дипломских и мастер радова на електротехничким факултетима у Београду и Источном Сарајеву.

ORCID: 0000-0003-2048-0606

Jelica Janićijević¹, Danilo Vlahović¹, Aleksandar Latinović¹, Željko Đurišić¹

Conceptual Design for Substituting Coal as Fuel in Units A1 and A2 of Nikola Tesla Thermal Power Plant Through the Application of Hydrogen Technologies Combined with Renewable Energy Sources

¹ University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia*

Original scientific research article

Highlights

- The key technological principles, limitations, and advantages of modern green hydrogen production methods were analyzed, with a focus on electrolysis.
- The challenges and solutions related to hydrogen storage were examined.
- Technological trends accelerating the adoption of hydrogen in energy systems were presented, including the growth of electrolyzer capacities, cost reductions, and improved integration with renewable energy sources.
- The paper highlights the importance of infrastructure optimization and the development of cost-effective solutions as prerequisites for the wider use of hydrogen in the decarbonization process.

Abstract

The integration of renewable energy sources (RES) into power systems (PS) represents a challenge due to their variable and non-dispatchable nature, which complicates the balancing of electricity generation and consumption. Stable operation of the power system requires dispatchable energy sources. On the other hand, the phase-out and shutdown of thermal power plants in the decarbonization process, as envisaged by the Integrated National Energy and Climate Plan, reduces the availability of dispatchable energy, thereby threatening balancing conditions and the energy independence of the power system. One of the proposed solutions is the utilization of surplus energy from renewable sources for the production of hydrogen and its derivatives, which can be stored and later used in gas-fired power plants as dispatchable energy sources.

This paper analyzes the conditions for establishing an energy complex for the production, storage, and utilization of hydrogen at the site of the existing Nikola Tesla Thermal Power Plant A. The basic concept is that the power plant would not be decommissioned in the future, but would instead transition from lignite to renewable fuel by replacing conventional boilers and steam turbines with gas turbine units adapted for hydrogen combustion. In this way, key infrastructure is preserved, particularly the grid connection facilities and the well-developed interconnection links of this important generation hub.

The potential for hydrogen production from photovoltaic power plants to be built in the area of the former Kolubara open-pit mines was also analyzed. A conceptual technological scheme of the process of hydrogen production, compression, storage, and utilization is presented, along with a calculation of the overall energy efficiency of the complete system. Based on available data, a preliminary estimate of the expected cost of generated electrical energy was carried out.

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the student paper “Conceptual Solution for the Decarbonization of Electricity Production at TPP ‘Nikola Tesla’ by Applying Hydrogen Technologies with Renewable Energy Sources” (<https://doi.org/10.2478/2656-908X.2025.00001>), awarded in the Expert Committee EC-C3 Sustainability of Power System and Environmental Protection Performance, at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, 26-30 May 2025.

Received: January 7th, 2026 Reviewed: July 1st, 2026
 Modified: July 10th, 2026 Accepted: July 13th, 2026
 *Corresponding author: Jelica Janićijević, +381 61/81-51-629
 E - mail: jelicajanicijevic616@gmail.com



The concept assumes that during periods of low electricity market prices, energy from photovoltaic plants or the transmission grid is directed to electrolysis, while the produced hydrogen is stored and used during periods of high demand and insufficient energy from available primary sources in the system. Additionally, the heat generated during electrolysis and hydrogen combustion can be utilized for thermal energy storage and for supplying thermal consumers, thereby increasing the overall efficiency of the system.

Keywords

Decarbonization, Hydrogen, Nikola Tesla Thermal Power Plant, Renewable Energy Sources

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 анода. 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

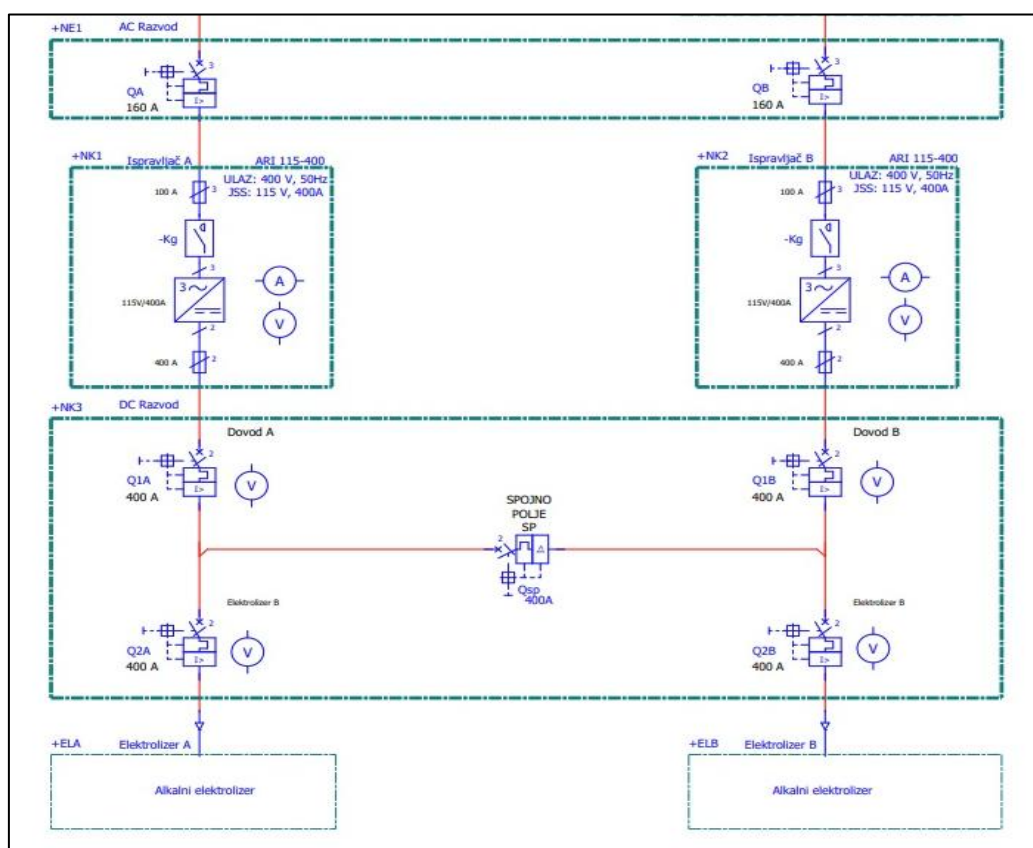
У досадашњој пракси постоји више различито примењених топологија претварача. У употреби су и транзистори и тиристори као прекидачки елементи. У општем случају претварачи могу бити реализовани као једностепени (AC-DC) и двостепени (AC-DC/DC-DC), [2]. У широкој употреби овакви претварачи раде са великим 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



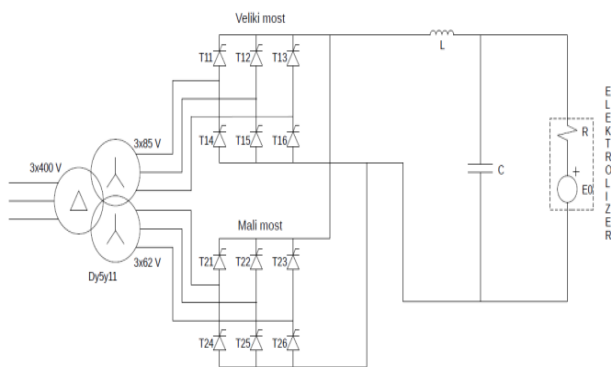
Слика 3. Једнополна шема постројења за напајање електролизера

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.

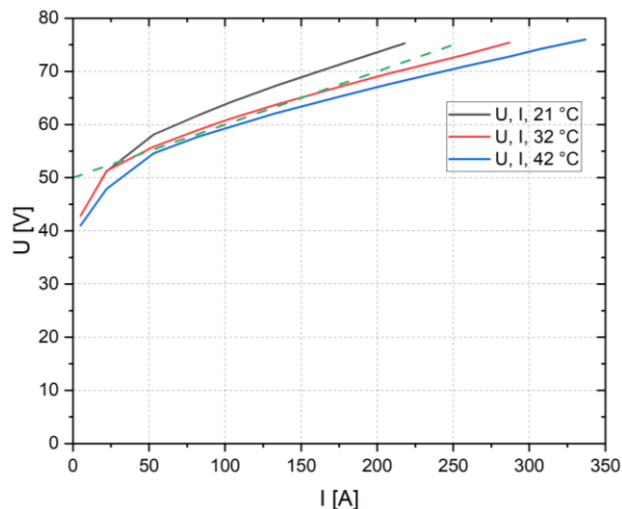
Енергетски део исправљача се састоји од тронамотајног трансформатора спреге Ду5у11, малог и великог тиристорског моста, и излазног LC филтра. Принципијелна шема исправљача приказана је на Слици 4. Поред тога, претварач поседује и расклопну опрему, командно-сигналне елементе, микропроцесорски регулатор са заштитама, 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.



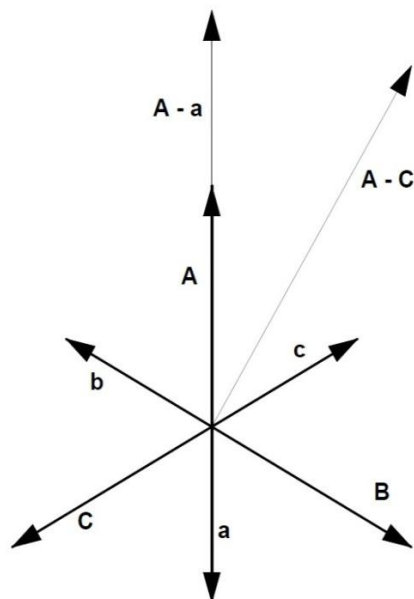
Слика 5. Статичка карактеристика електролизера са линеаризованом карактеристиком модела

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 оваког 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.

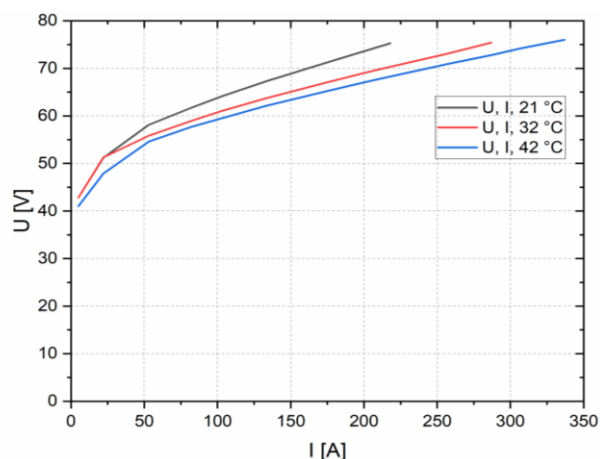


Слика 8. Изглед исправљача – задња страна

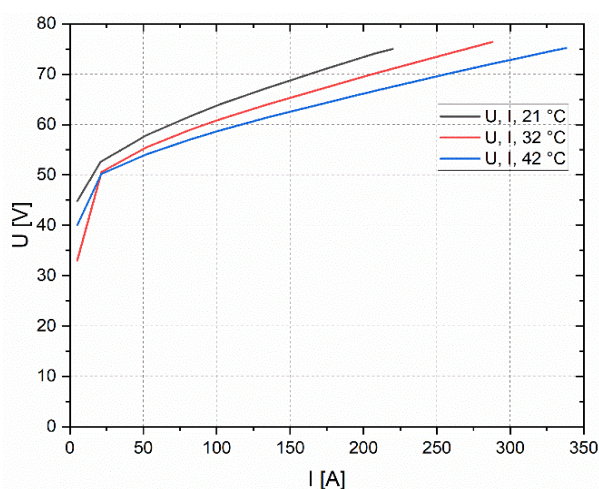
4. МЕРЕЊА УЛАЗНО-ИЗЛАЗНИХ ВЕЛИЧИНА И АНАЛИЗА РАДА ИСПРАВЉАЧА

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



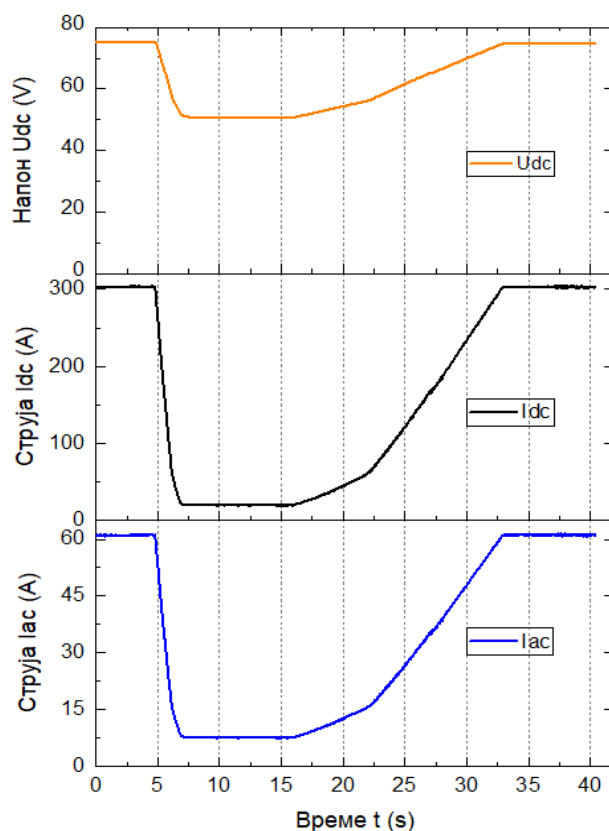
Слика 9. Статичка карактеристика електролизера 1



Слика 10. Статичка карактеристика електролизера 2

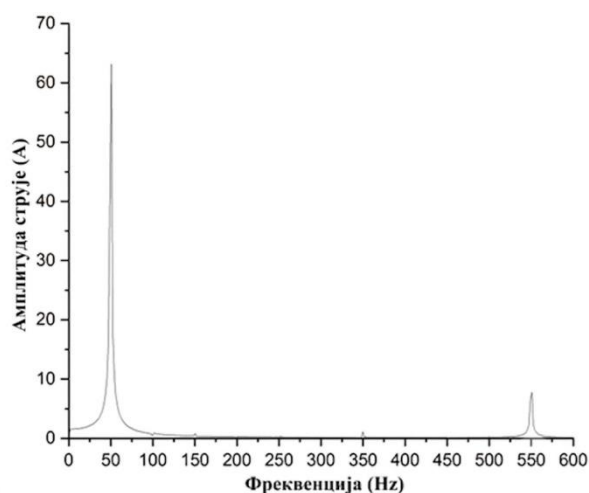
Конструисана је наменска микроконтролерска плоча која генерише упаљачке импулсе за тиристорски мост, која регулише излазне параметре и има НМІ функцију. Регулација излазне величине се врши применом PID регулатора. Узимајући у обзир специфичности рада постројења за електролизу, формиран је и програм регулације 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

Мирослав Поповић¹, Александар Милић¹, Никола Мирковић²

Моделовање губитака GaN прекидача

на основу каталошких података



¹ Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, Београд, Србија*

² Универзитет у Београду – Електротехнички институт „Никола Тесла” АД, Београд, Србија

<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.4>

Оригинални научно-истраживачки рад

Кључне поруке

- Извођење алгоритма за оцену губитака GaN прекидача снаге
- Поређење тврдых, меких и полумеких прекидачких процеса и издвајање струјног доприноса канала и паразитних капацитивности
- Верификација модела кроз прототип синхроног спуштача напона снаге 1 kW

Кратак садржај

Прекидачи засновани на савременим полупроводницима великог енергетског процена, као што је галијум-нитрид (GaN), све чешће се користе у уређајима енергетске електронике. Због специфичне структуре и способности да брзо мењају радно стање, стандардни прорачуни који се користе за одређивање губитака у силицијумским прекидачима нису применљиви у овом случају. Стога је развијен аналитички модел за процену губитака код GaN прекидача у конфигурацији полумоста, који се ослања на податке из техничке документације. Модел узима у обзир различите типове комутација, као што су тврдо, меко и полумеко комутавање. Извршено је поређење губитака при меком и тврдом комутавању прекидача у склопу синхроног спуштача напона. На основу предложеног модела одређена су времена трајања комутација, која су искоришћена како би се верификовао предложени модел на претварању спуштачу напона снаге 1 kW.

Кључне речи

GaN прекидачи снаге, модел губитака, синхрони спуштач напона

Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију студентског рада „Аналитички модел губитака GaN транзистора на основу података из техничке документације” (<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.4>), награђеног у Студијском комитету СТК-Б4 HVDC и енергетска електроника, на 37. Саветовању CIGRE Србија, Златибор, 26-30. маја 2025.

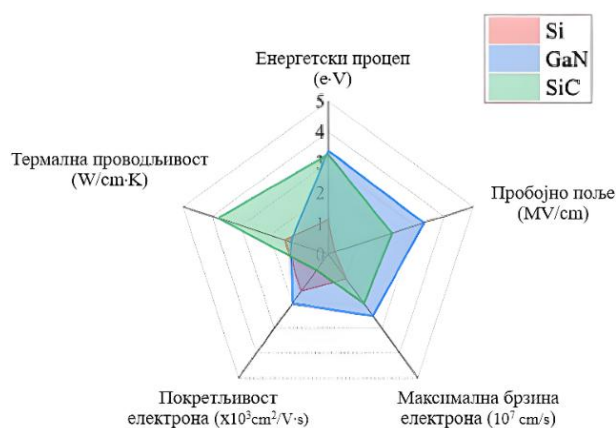
Примљено: 16. децембар 2025. Рецензирано: 3. јул 2026.
Измењено: 8. јул 2026. Одобрено: 22. јул 2026.

* Кореспондирајући аутор: Мирослав Поповић

Имејл: miroslav@etf.bg.ac.rs

1. УВОД

Вишедеценијски напредак у развоју уређаја енергетске електронике довео је до скоро потпуног искоришћења потенцијала прекидача снаге заснованих на силицијумској (Si) технологији. Због тога је даљи развој претварача који се ослањају на ову врсту полупроводника постао знатно сложенији. Међутим, појава прекидача који користе полупроводнике са високим енергетским процепом, као што су галијум-нитрид (GaN) и силицијум-карбид (SiC), омогућила је дизајн нових топологија, као и постизање веће ефикасности и мањих димензија претварача, [1]. Као што је приказано на Сlici 1, GaN полупроводници у поређењу са Si и SiC, одликују се већом електронском покретљивошћу, већом максималном брзином електрона и већим прободним пољем, [1].



Слика 1. Упоредна анализа полупроводничких технологија, [1]

С обзиром на то да GaN материјал има знатно већи енергетски процеп и прободно поље у односу на силицијумске полупроводнике, омогућен је дизајн краћег проводног канала унутар прекидача за исту вредност прободног напона. Краћи проводни канал, заједно са већом густином паковања GaN прекидача, доводи до мањег отпора проводног канала и смањених паразитних капацитивности. Наведене особине пружају мању снагу губитака током процеса укључења и искључења прекидача, што омогућава постизање значајно већих прекидачких учестаности, [2].

Да би се искористио пун потенцијал GaN прекидача, потребно је направити поуздан физички модел који описује процес прекидања, ради одређивања укупних губитака снаге и максималне учестаности прекидања. До сада развијени модели прекидања за Si прекидаче нису применљиви на GaN уређаје, будући да је хемијска и физичка структура ових прекидача другачија, [2], [3]. Процес прекидања код GaN прекидача и Si прекидача, иако на први поглед сличан, знатно се разликује. Галијум-нитридна технологија омогућава већу брзину прекидања, при чему утицај нелинеарних паразитних капацитивности постаје значајан и не може се занемарити. Уз то, принципи провођења и успостављање проводног канала разликују се у поређењу са силицијумским прекидачима. У [4] приказан је део по део линеарног

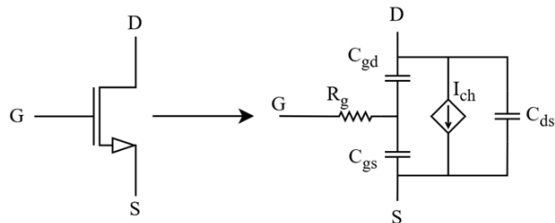
модела губитака. Овакав приступ омогућава брзу и једноставну оцену губитака, али не уважава нелинеарну зависност паразитних капацитивности од кореспондирајућих напона, услед чега долази до значајних грешака у процени при учестаностима прекидања у области од неколико стотина килохерца. Детаљнији модел губитака представљен је у [5] и уважава нелинеарну зависност паразитних капацитивности, али занемарује нелинеарну зависност транскондуктансе GaN прекидача снаге. Имајући у виду наведена ограничења, у овом раду развијен је аналитички модел прекидања GaN прекидача који истовремено уважава нелинеарне зависности паразитних капацитивности и транскондуктансе, те омогућава прецизно одређивање укупних губитака снаге на прекидачу у поређењу са тренутно доступним решењима у литератури. Развијени модел се заснива на неапроксимираним подацима из техничке документације произвођача и узима у обзир физичку структуру прекидача.

У Поглављу 2 описан је модел GaN прекидача и физичке зависности између моделованих елемената. Приликом моделовања, ради прецизнијег одређивања губитака, укупна струја прекидача подељена је на два доприноса – струју проводног канала и струју паразитних капацитивности. Наиме, током комутације не протиче целокупна струја искључиво кроз проводни канал прекидача снаге. Значајан део струје, посебно у фазама прелаза, одваја се на пуњење и пражњење паразитних капацитивности уређаја, што директно утиче на динамичко понашање прекидача и утиче на укупне комутационе губитке. Због тога је ова подела, поред уважавања нелинеарних капацитивности и транскондуктансе GaN прекидача снаге, кључна за реалистично моделовање и тачну оцену енергетских губитака током рада прекидача, [2]. Такође, укључење и искључење прекидача подељено је у сегменте и детаљно је описано за прекидаче у конфигурацији полумоста. За одабрани прекидач у Поглављу 3 приказано је издвајање релевантних података из техничке документације и приказан је алгоритам за оцену губитака. На самом крају, експериментални резултати, који потврђују поузданост модела, дати су у Поглављу 4.

2. МОДЕЛ ПРЕКИДАЧА И КОМУТАЦИОНОГ ПРОЦЕСА

Прекидачи снаге засновани на GaN технологији, иако по својој структури подсећају на Si MOSFET (енгл. *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) уређаје, поседују одређене специфичности које значајно утичу на њихово понашање приликом прекидања. У овом поглављу детаљно је описан електрични модел GaN прекидача са акцентом на кључне разлике у односу на класичне силицијумске MOSFET прекидаче. За потребе аналитичког моделовања и прорачуна губитака снаге на прекидачима дати су и детаљно описани теоријски и аналитички процеси прекидања за случај укључења и искључења прекидача у полумосној конфигурацији. Као резултат добија се систем диференцијалних

једначина путем којег се могу одредити временски облици струје канала $I_{ch}(t)$ и напона канала $v_{ds}(t)$ потребни за прорачун губитака током процеса укључења и искључења прекидача. Модел GaN прекидача приказан је на Слици 2 и у великој мери одговара моделу Si MOSFET прекидача.



Слика 2. Модел GaN прекидача

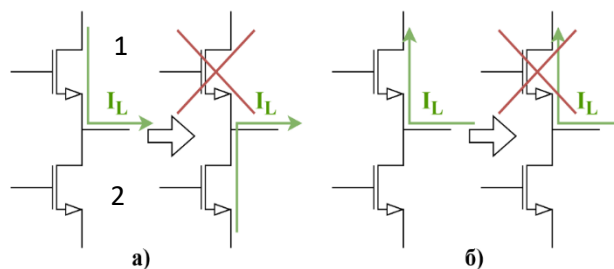
Главна разлика огледа се у одсуству уграђене диоде за провођење струје у супротном смеру. Због своје симетричне структуре, приликом провођења струје у супротном смеру дрејн (*drain*) и сорс (*source*) електроде мењају своју улогу. Потенцијал дрејн електроде је сада нижи од гејт (*gate*) потенцијала, тако да сада напон v_{gd} диктира проводност канала и омогућава прекидачу да проводи струју. У даљем тексту овај механизам провођења биће назван инверзно провођење GaN прекидача.

2.1 Прекидачки процес прекидача снаге у полумосној конфигурацији

Два прекидача у полумосној конфигурацији представљају универзалну прекидачку ћелију у савременим енергетским претварачима снаге, [1]. Иако ова конфигурација није присутна у дословно свакој топологији, већина практичних архитектура претварача снаге може се разложити на ћелије у полумосној конфигурацији или на неке њихове проширене варијанте, [6]. У овом потпоглављу биће изведен и детаљно објашњен процес прекидања два GaN прекидача у полумосној конфигурацији. На основу изведеног модела, у Поглављу 3 биће пројектован алгоритам за оцену губитака на прекидачима.

Прекидање прекидача у полумосној конфигурацији представља процес пребацивања струје са једног прекидача на други. Да би се спречио кратак спој (*shoot-through*) између горњег и доњег прекидача у полумосту, уводи се концепт мртвог времена (*dead time*). То је кратак временски размак између тренутка искључења једног прекидача и тренутка укључења другог прекидача. Мртво време осигурава да први прекидач у потпуности буде искључен пре него што се пошаље сигнал за укључење другог прекидача, чиме се ефикасно спречава појава провођења струје кроз оба прекидача. Прекидачки процес у полумосној конфигурацији условљен је радним режимом претварача, то јест смером струје кроз прекидач који се искључује. Могу се издвојити две различите врсте прекидања, при чему се основна разлика између њих

огледа у смеру струје кроз канал прекидача I_L у тренутку прекидања, као што је приказано на Слици 3.



Слика 3. Врсте прекидања за различит смер струје: а) „позитиван” смер струје; б) „инверзан” смер струје

Прва врста прекидања приказана је на Слици 3а и подразумева да је струја постојала у смеру од дрена ка сорсу прекидача у тренутку искључења. На Слици 3а дат је пример искључења горњег прекидача у полумосту. Након искључења проводног прекидача струја прелази на супротни прекидач у полумосту. Ова врста искључења у литератури је познатија као тврдо искључење. Како се струја не може тренутно прекинути, једновременно са описаним процесом супротни прекидач означен бројем 2 на Слици 3 преузима тренутну јачину струје и то кроз његове паразитне капацитивности, будући да смер струје то омогућава. После потпуног пражњења паразитне капацитивности C_{ds} , прекидач 2 проводи струју путем инверзног механизма провођења и тај процес траје док не истекне остатак мртвог времена. Када мртво време истекне, овај прекидач може бити укључен у условима нултог напона. Ова појава назива се меко укључење, будући да је проток струје оптерећења природно испразнио паразитну капацитивност C_{ds} , [1]. Закључујемо да је прва врста прекидања одређена смером струје од дрена ка сорсу прекидача који се искључује и карактерише је секвенца тврдо искључење – меко укључење.

Друга врста прекидања (Слика 3б), подразумева да је струја кроз полупроводнички уређај који се искључује имала смер од сорса ка дрени, при чему струја после искључења наставља да пролази кроз исти прекидач путем инверзног провођења GaN прекидача. Овакво искључење прекидача у литератури је познато као меко искључење. Безгубитним или меким процесом се сматра само прелазак из регуларног механизма провођења у инверзни механизам провођења, али се надаље кондукциони губици повећавају услед пораста напона v_{sd} . У овом случају, капацитивност C_{ds} другог прекидача није испразњена током мртвог времена јер нема потребне количине усмереног наелектрисања које би то омогућило, као у првом случају. Укључење прекидача које следи након истека преосталог мртвог времена назива се тврдо укључење. Закључујемо да је друга врста прекидања одређена смером струје од сорса ка дрени прекидача који се искључује и карактерише је секвенца меко искључење – тврдо укључење.

Обе врсте прекидачког процеса дате су на примеру искључења горњег – укључења доњег прекидача у полумосту, али се без губитка општости могу извести исти закључци за супротну секвенцу, пратећи смер струје кроз проводни прекидач.

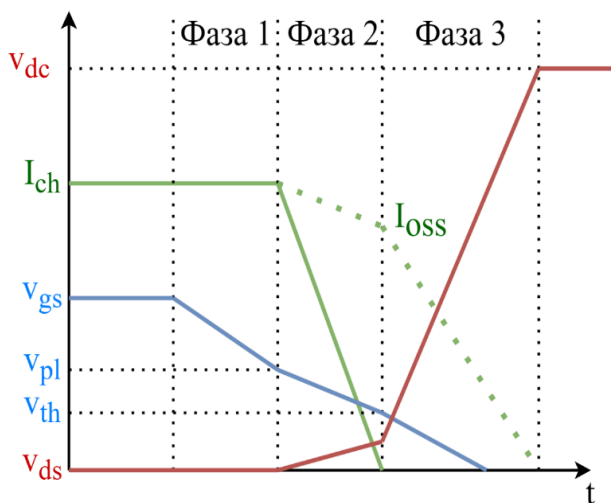
За оба случаја разматра се GaN модел приказан на Слици 2. Током прекидачког процеса, прекидач ради у омском режиму рада. У том режиму, проводни канал се може моделовати као контролисани извор струје I_{ch} , где је вршина вредност струје I_{ch} повезана са напонем v_{gs} преко транскондуктансе g_m . Приликом свих описаних прекидачких процеса претпостављено је да се излазна струја полумоста I_L не мења и да остаје константна током трајања процеса прекидања. У наредним одељцима детаљно ће бити описан процес укључења, као и искључења прекидача снаге.

2.2 Искључење прекидача

Процес искључивања GaN прекидача снаге описан је посебно за прву и другу врсту прекидања. Сваки од ових процеса искључења раздвојен је на специфичне фазе како би се омогућила прецизна анализа понашања прекидача и губитака у прелазном стању. На овај начин, могуће је разумети динамику уређаја и касније оптимизовати управљачке сигнале за постизање максималне ефикасности.

2.2.1 Прва врста прекидања – тврдо искључење

Као што је објашњено у Одељку 2.1, искључење прекидача током прве врсте прекидања подразумева да прекидну струју I_L преузима други прекидач у полумосту. Овај случај подељен је на три фазе као што је приказано на Слици 4. До овакве врсте прекидања долази када је струја I_L позитивна, то јест има смер од дрејна ка сорсу проводног прекидача.



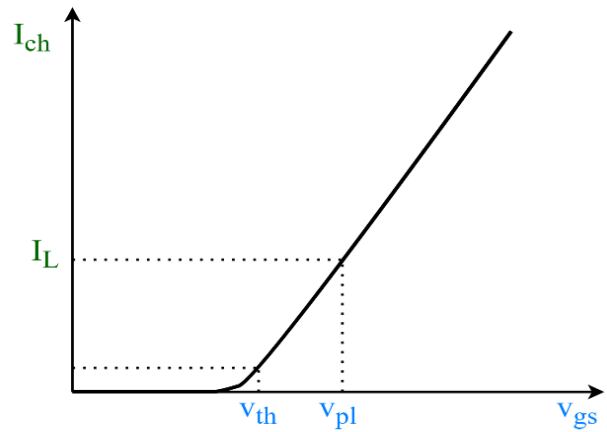
Слика 4. Прва врста прекидања – тврдо искључење

Током прве фазе упалач је добио наредбу за искључење и почиње да смањује напон v_{gs} . Напон v_{gs} мења своју вредност по следећем закону:

$$v_{gs} = v_{dr_on} \cdot e^{-\frac{t}{R_e C_{gs}}}, \quad (1)$$

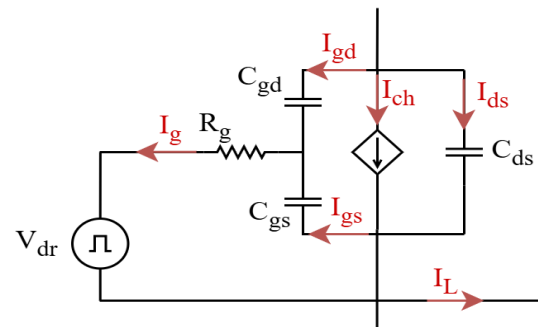
где је v_{dr_on} напон укључења прекидача који даје упалач, а R_e укупна отпорност упалачког кола и представља збир сопствене отпорности гејта транзистора, екстерног отпорника упалачког кола и излазне отпорности упалача.

Током ове фазе кроз проводни канал прекидача пролази константна струја $I_{ch} = I_L$. Прекидач се све време током прве фазе налази у засићењу, тако да струја канала не зависи од напона v_{gs} . У тренутку када се напон v_{gs} изједначи са напонем Милеровог платоа v_{pl} , где је v_{pl} напон који одговара струји I_L на преносној карактеристици прекидача приказаној на Слици 5, завршава се прва фаза. У том тренутку прекидач излази из засићеног радног режима и почиње да ради у омској области где је струја канала I_{ch} директно сразмерна напону гејта, v_{gs} .



Слика 5. Струјно-напонска карактеристика GaN прекидача

Током друге фазе напон v_{gs} наставља да опада, али је његово смањивање успорено јер упалач у овом тренутку почиње да пуни паразитну капацитивност C_{gd} , као што је приказано на Слици 6.



Слика 6. Смерови струја у моделу GaN прекидача приликом друге фазе

Диференцијална једначина која описује промену v_{gs} дата је са (2), [7]:

$$\frac{dv_{gs}}{dt} = \frac{I_g}{C_{gd} + C_{gs}} - \frac{C_{gd}}{C_{gd} + C_{ds}} \cdot \frac{(I_L - I_{ch})}{2} \cdot \frac{1}{(C_{gd} + C_{gs})}, \quad (2)$$

док се струја канала I_{ch} мења нелинеарно са променом v_{gs} и то по кривој приказаној на Слици 5. Битно је нагласити да све паразитне капацитивности прекидача, као што су C_{gs} , C_{gd} и C_{ds} , нису константне, већ представљају нелинеарне функције одговарајућих напона. Због тога је, за прецизну анализу у сваком тренутку, неопходно познавати тренутне вредности напона v_{gs} , v_{ds} и v_{gd} како би се тачно одредиле вредности ових капацитивности. Пошто је вредност v_{gs} позната у сваком тренутку, потребно је одредити и v_{ds} и v_{gd} . Напон $v_{ds}(t)$ може се одредити решавањем следеће диференцијалне једначине, [1]:

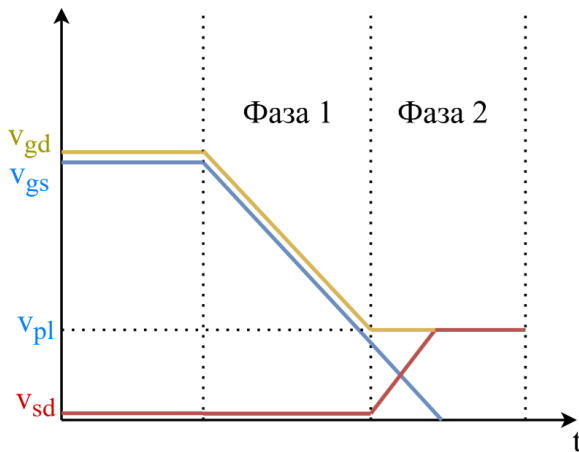
$$\frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{I_L - I_{ch}}{C_{oss1} + C_{oss2}}, \quad (3)$$

где су C_{oss1} и C_{oss2} излазне капацитивности прекидача и представљају збир C_{ds} и C_{gd} . Напон v_{gd} добија се као разлика напона v_{gs} и v_{ds} . Друга фаза траје док струја канала I_{ch} не падне на нулу, тачније док напон v_{gs} не достигне напон прага провођења v_{th} .

Током треће фазе проводни канал прекидача је затворен, али укупна струја кроз прекидач је различита од нуле и то све док се не напуне паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} . Једначине наведене за другу фазу и даље важе с тим да је сада $I_{ch} = 0$.

2.2.2 Друга врста прекидања – меко искључење

Током друге врсте прекидања (Слика 3б), активни прекидач се искључује, али целокупна струја наставља да протиче кроз њега процесом инверзног провођења GaN прекидача. Овај процес представља прелазак прекидача из засићеног режима рада у инверзни режим провођења, приказан је на Слици 7 и подељен је у две фазе.



Слика 7. Друга врста прекидања – меко искључење

До ове врсте прекидања може доћи само ако је струја I_L негативна, то јест ако има смер од сорса ка дрејну проводног прекидача (Слика 3б). Приликом ове врсте прекидања напон v_{sd} не расте до напона v_{dc} већ до напона инверзног провођења GaN прекидача. За уређаје мале снаге овај напон износи неколико волти.

Прва фаза је идентична као код првог случаја и његове прве фазе описане у Потпоглављу 2.2.1, тако да се напон v_{gs} мења по закону описаном у једначини (1). Напон v_{gd} током ове фазе једнак је збиру напона v_{gs} и v_{sd} . Пад напона на проводном каналу v_{sd} током ове фазе је константан и једнак је производу отпорности проводног канала $R_{ds,on}$ и струји канала I_{ch} .

Друга фаза почиње када напон v_{gd} достигне Милеров плато v_{pl} , то јест напон који одговара струји I_L на преносној карактеристици датој на Слици 3. После тог тренутка, напон v_{gd} остаје константан. Напон v_{gs} наставља да се мења по једначини (2). Пошто је напон v_{gd} константан а напон v_{gs} опада, пад напона на проводном каналу прекидача v_{sd} током ове фазе ће расти и може се одредити преко следеће једначине:

$$v_{sd} = v_{gd} + v_{sg}. \quad (4)$$

2.3 Укључење прекидача

Приликом укључења прекидача снаге поново се разликују две врсте прекидања – када струја I_L има позитиван (од дрејна ка сорсу) и када има инверзан (од сорса ка дрејну) смер (Слика 2). Сваки од наведених процеса је, слично анализи искључења, подељен на фазе. Подела на фазе омогућава прецизно разумевање динамике уређаја током преласка из искљученог у укључено стање, што ће касније бити неопходно за тачну процену прекидачких губитака и оптимизацију перформанси.

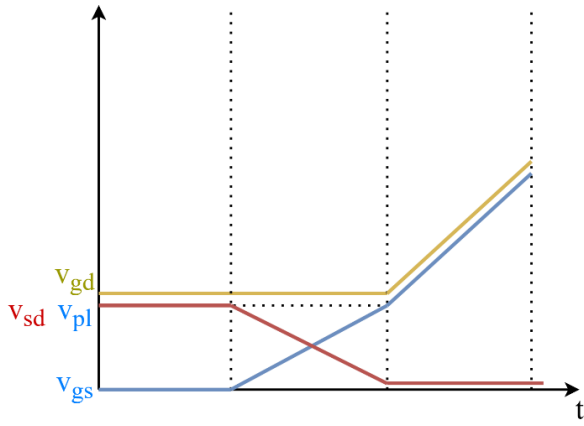
2.3.1 Прва врста прекидања – меко укључење

Током укључења прекидача приликом прве врсте прекидања (Слика 3а), подразумева се да су његове паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} испразњене (током искључења супротног прекидача) и да кроз прекидач путем инверзног провођења пролази струја јачине I_L . Овај случај подељен је у две фазе као што је приказано на Слици 8.

Током прве фазе напон v_{gd} је константан и одговара напону Милеровог платоа за струју I_L , док се напон v_{gs} повећава и то по једначини:

$$v_{gs} = v_{dr,on} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{e}C_{gs}}} \right). \quad (5)$$

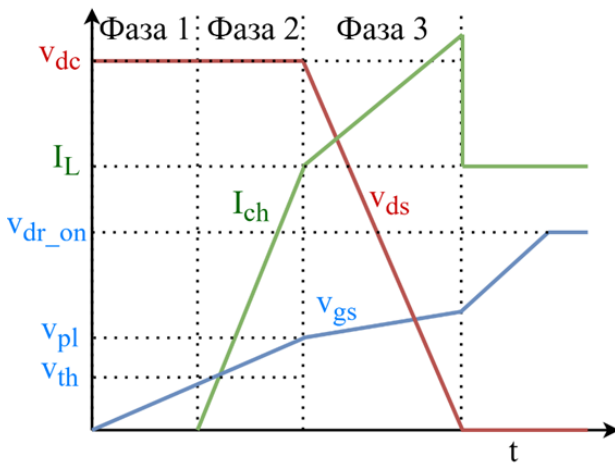
У тренутку када напон v_{gs} достигне напон Милеровог платоа за струју I_L , инверзно провођење GaN прекидача престаје и сада је активна област у потпуности проводна и дозвољава пролазак струје у оба смера. Током друге фазе напон v_{gs} наставља да расте по динамици приказаној у (5) и достиже вредност $v_{dr,on}$.



Слика 8. Прва врста прекидања – меко укључење

2.3.2 Друга врста прекидања – тврдо укључење

Током укључења прекидача приликом друге врсте прекидања, Слика 3б, паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} нису претходно испразњене, као у претходном случају, тако да их је потребно испразнити током прекидачког процеса. Укључење се у овом случају одвија у три фазе, приказане на Слици 9.

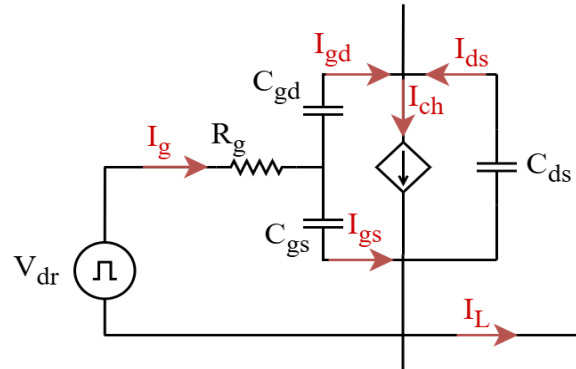


Слика 9. Друга врста прекидања – тврдо укључење

Током прве фазе напон v_{gs} расте до напона прага провођења прекидача v_{th} . И током прве и током друге фазе напон v_{gs} се мења по једначини (5). У тренутку када струја кроз активну област прекидача крене да расте почиње друга фаза.

Током друге фазе напон v_{gs} расте од напона прага провођења v_{th} до напона Милеровог платоа v_{pl} који одговара струји I_L , док струја расте од нулте вредности до I_L . Веза између напона v_{gs} и струје I_L дата је на Слици 2. Док прекидач који се укључује не преузме сву струју са прекидача који је у инверзном механизму провођења, не може да дође до пада напона v_{ds} . Разлог због чега долази до ове појаве крије се у самом инверзном механизму провођења који не дозвољава паду напона на својој активној области да се мења докле год постоји нека инверзна струја која протиче кроз канал.

Током треће фазе, паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} се празне и то струјом кроз активни канал прекидача, као што је приказано на Слици 10.



Слика 10. Смерови струја у моделу GaN прекидача приликом друге врсте прекидачког процеса – укључење

Током ове фазе долази до значајног повећања струје активне области прекидача I_{ch} , тако да је и напрезање које полупроводник трпи значајно веће од напора устаљеног радног режима. Струја кроз активну област I_{ch} и даље је повезана са напоном v_{gs} преко графика датог на Слици 10.

Брзина промене напона v_{gs} сада је знатно успорена јер струја коју даје упалач не пуни само капацитивност C_{gs} већ и празни капацитивност C_{gd} . Промена напона v_{gs} дата је, [7], помоћу:

$$\frac{dv_{gs}}{dt} = \frac{I_g}{C_{gd} + C_{gs}} - \frac{C_{gd}}{C_{gd} + C_{ds}} \cdot \frac{(I_{ch} - I_L)}{2} \cdot \frac{1}{(C_{gd} + C_{gs})}, \quad (6)$$

док се промена напона v_{ds} одвија по једначини:

$$\frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{I_{ch} - I_L}{C_{oss1} + C_{oss2}}. \quad (7)$$

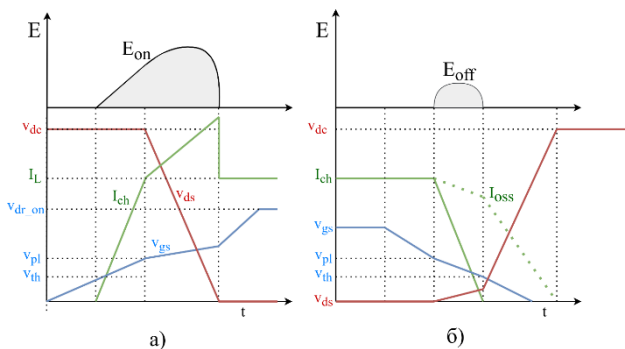
Решавањем система диференцијалних једначина (1) – (7) и узимањем у обзир да су вредности свих паразитних капацитивности функције напона на њима, добијају се временски облици струје $I_{ch}(t)$ и напона $v_{ds}(t)$. Временски облици струје $I_{ch}(t)$ и напона $v_{ds}(t)$ потребни су како би се прецизно одредили губици на прекидачима.

3. ПРОРАЧУН ГУБИТАКА

Кључни показатељи перформанси једног претварача снаге су ефикасност, величина и цена. Ефикасност се може повећати одабиром GaN полупроводничких компоненти са бољим статичким и динамичким карактеристикама од конвенционалних Si прекидача. Боље динамичке карактеристике омогућавају рад на већим фреквенцијама, што доводи до смањења потребних димензија пасивних компоненти као што су трансформатори, пригушнице и кондензатори, [4]. Да би се у потпуности искористиле предности GaN прекидача, неопходно је развити поуздан модел за прорачун губитака. На основу таквог модела могуће је одредити који GaN прекидач је најпогоднији за конкретну

примену, да ли је потребно додатно хлађење, који тип хлађења је адекватан, као и максималну радну учестаност прекидања претварача. У овом поглављу биће разрађен модел за оцену губитака на основу претходно изведених релација и информација сакупљених из техничке документације прекидача.

Губици у прекидачима током једног прекидачког циклуса обухватају: губитке при укључењу, губитке при искључењу, губитке у гејт петљи, губитке током провођења струје и губитке услед механизма инверзног провођења. На Слици 11 приказани су таласни облици енергије губитака при тврдом укључењу и искључењу прекидача. Битно је уочити да је преклапање струје и напона значајно израженије приликом укључења прекидача, због чега је и енергија губитака при укључењу већа него при искључењу. У одређеним топологијама, у којима се могу реализовати два прекидачка прелаза прве врсте (Слика 3а), а које карактерише секвенца меког укључења и тврдог искључења у оквиру једне периоде прекидања, могуће је у великој мери смањити укупне прекидачке губитке. У том случају, током једне периоде добијају се два мека укључења и два тврда искључења. Оваква секвенца је карактеристична за LLC резонантне претвараче, који применом GaN прекидача могу постићи веома високе ефикасности у поређењу са другим изолованим DC/DC топологијама. Иако је овај режим рада уобичајен за LLC претвараче, могуће га је реализовати и у синхронном спуштачу напона, под условима који ће бити детаљно размотрени у Поглављу 3.2.



Слика 11. Енергија губитака приликом тврдог а) укључења б) искључења

Укупни комутациони и кондукциони губици могу се изразити као производ струје која тече кроз проводни канал прекидача и пада напона на њему:

$$P_{total} = \frac{1}{T_{PWM}} \int_0^{T_{PWM}} I_{ch}(t) \cdot v_{ds}(t) \cdot dt. \quad (8)$$

Да би се оценила снага губитака на прекидачу, потребно је одредити временске таласне облике величина од значаја у функцији радних режима. Како би се

одредили временски облици струје канала $I_{ch}(t)$ и пада напона на каналу $v_{ds}(t)$, потребно је решити систем диференцијалних једначина којим је резултовало Поглавље 2. Да би систем једначина (1) – (7) био решив, потребно је познавати следеће зависности:

$I_{ch}(v_{gs})$ – зависност струје активне области прекидача од напона v_{gs} ;

$I_{ch}(v_{gd})$ – зависност струје активне области прекидача од напона v_{gd} приликом инверзног провођења струје;

$C_{ds}(v_{ds})$ – зависност капацитивности дрејн–сорс од пада напона на активној области прекидача v_{ds} ;

$C_{gd}(v_{gd})$ – зависност капацитивности гејт–дрејн од напона v_{gd} ;

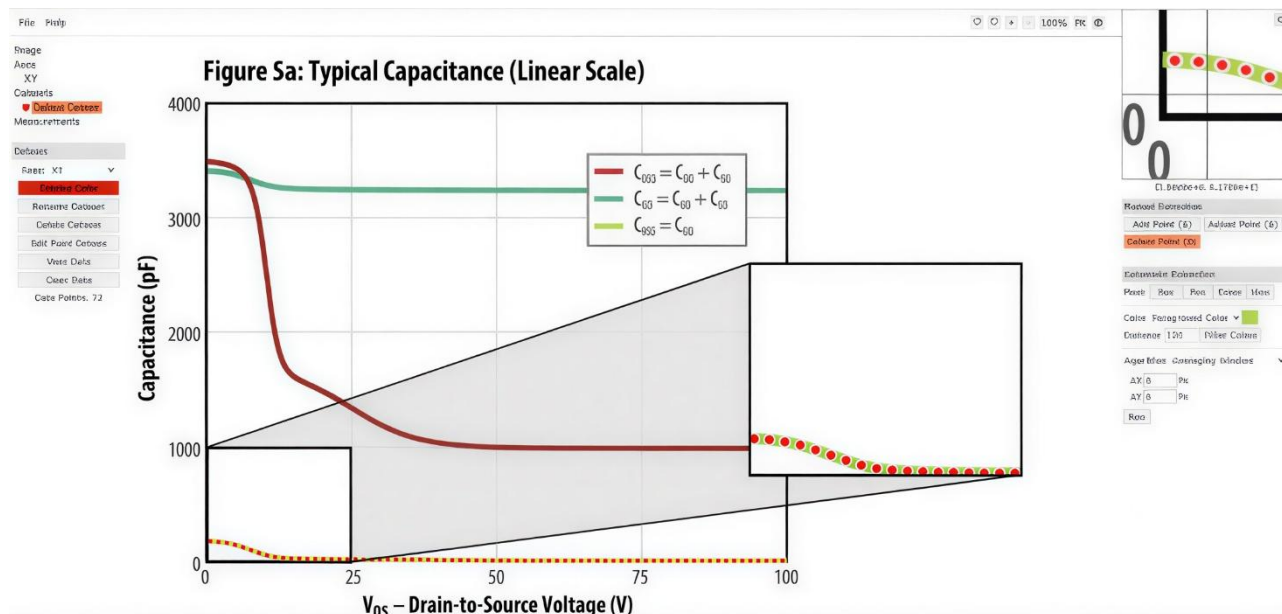
$C_{gs}(v_{gs})$ – зависност капацитивности гејт–сорс од напона v_{gs} .

Претходно наведене зависности могу се прецизно одредити експерименталним методама, као што је тест двоструког укључења (*Double-pulse test*). Међутим, овај приступ често није практичан јер подразумева набавку компоненте и спровођење свих мерења како би се проверила њена погодност за одређену примену. Алтернативни начини укључују употребу апроксимационих израза, прилагођавање кривих или, у случају паразитних капацитивности, примену модела заснованог на наелектрисањима (*charge-based model*). Иако мерења зависности представљају најпоузданији извор података, до њих се најтеже долази, док апроксимационе методе често доводе до значајних одступања.

Због тога је у овом раду примењен другачији приступ. На основу кривих датих у техничкој документацији прекидача, коришћењем софтверског пакета *Automeris* одређене су дискретне вредности тражених величина. Из ових дискретних зависности и диференцијалних једначина добијених дискретизацијом израза (1) – (7), могуће је одредити таласне облике $I_{ch}(t)$ и $v_{ds}(t)$.

3.1 Прикупљање података из техничке документације

Подаци у техничкој документацији прекидача најчешће су представљени у облику графика, који су добијени на основу мерења која је произвођач спровео и потом приказао у техничкој документацији. Уколико произвођач не располаже табеларним вредностима тражених зависности или није вољан да их подели, неопходно је извршити издвајање података директно са графика из техничке документације. У овом раду тај поступак је реализован коришћењем софтверског пакета [8]. Пример коришћења овог алата дат је на Слици 12.



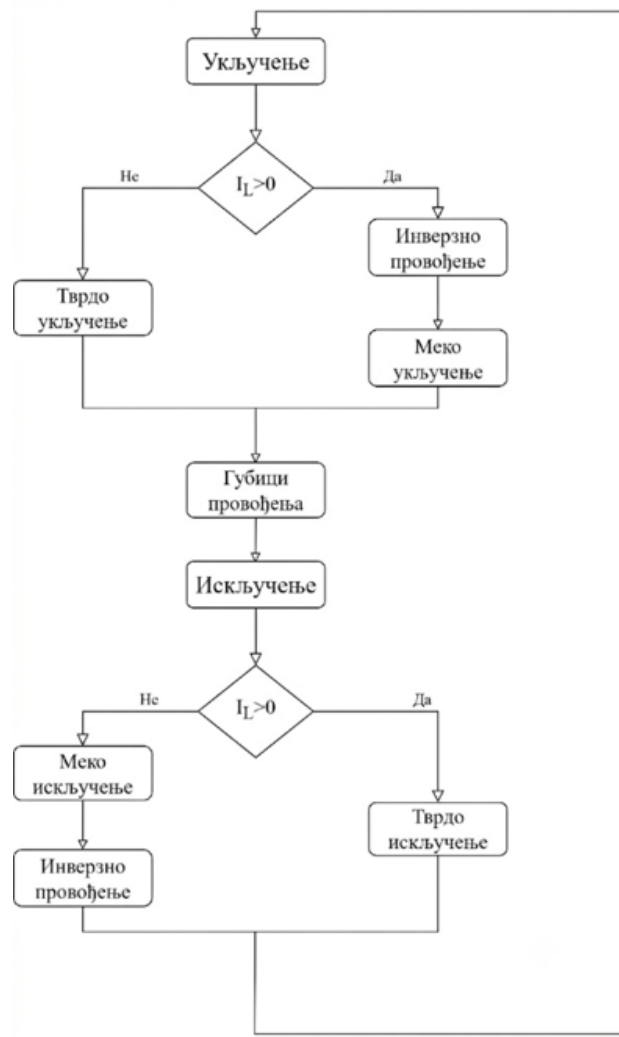
Слика 12. Коришћење алата за издвајање података из техничке документације

Овај софтверски пакет намењен је дигитализацији графичких података, односно издвајању нумеричких вредности са слика графика. Овај алат омогућава кориснику да на једноставан начин из постојећих дијаграма добије табеларне податке погодне за даљу анализу и прорачун. Слика приказује промену паразитних капацитивности извучених из техничке документације комерцијално доступног GaN прекидача у зависности од напона дрејн-сорс v_{ds} . Софтверски пакет је коришћен да би се у више од 100 тачака процениле дискретне вредности капацитивности, које су означене црвеним тачкама, чиме је обезбеђена висока тачност приказане зависности.

3.2 Алгоритам за оцену губитака

На основу диференцијалних једначина изведених у Поглављу 2 и података сакупљених из техничке документације могуће је оценити губитке дисипиране на прекидачима. Како би се одредило радно стање прекидача и врста прекидачког процеса која се реализује, у сваком тренутку је потребно познавати струју полумоста I_L . Струја I_L не зависи директно од врсте прекидача већ од спољних параметара електричног кола као што су напон једносмерног кола и вредности пасивних елемената или активног оптерећења. Познавањем струје I_L на основу алгоритма приказаног на Сlici 13 могуће је одредити стања кроз која пролази прекидач током једног периода прекидања. Под позитивним смером струје сматра се струја која има смер од дрејна ка сорсу, док је негативан смер струје од сорса ка дрејну.

Резултат алгоритма јесу дискретне вредности пада напона на проводном каналу $v_{ds}(k)$ и струје проводног канала $I_{ch}(k)$, те се губици на том прекидачу током једне периоде одређују на основу дискретизоване једначине (9).



Слика 13. Стања кроз која пролази један прекидач у полумосту током једног циклуса прекидања

$$P_{total} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I_{ch}(k) \cdot v_{ds}(k) \quad (9)$$

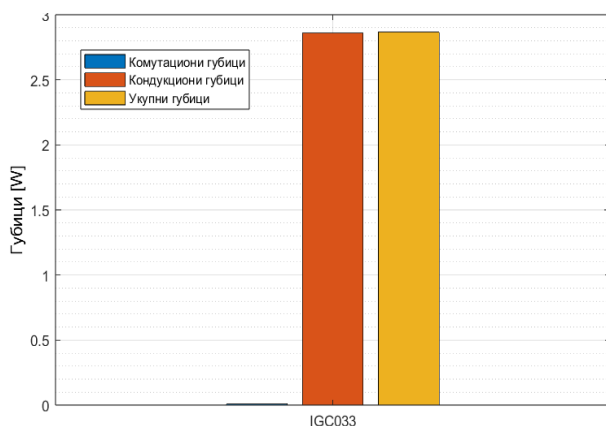
3.3 Оцена губитака

У овом поглављу извршена је анализа и процена прекидачких губитака за изабрани GaN прекидач у полумосној конфигурацији. Губици су одређени и међусобно упоређени за две различите вредности таласности струје, са циљем да се сагледа утицај различитих секвенци прекидачких стања на укупну дисипацију снаге. У ту сврху развијена су скрипта у програмском пакету [9], која су омогућила решавање система диференцијалних једначина добијених дискретизацијом израза (1) – (7) коришћењем Ојлерове дискретизационе методе првог реда. Стања система су одређена применом алгоритма приказаног на Слици 13, чиме је омогућено проучавање губитака прекидача у различитим радним режимима претварача.

Процена губитака извршена је при следећим условима. Снага претварача одређена је да буде $P = 1 \text{ kW}$, улазни напон је $V_{in} = 60 \text{ V}$ и фактор испуне $d = 0,75$, док су остали параметри од значаја дати у Табели I. Укупни губици на оба прекидача у полумосној конфигурацији дати су на Слици 14, за случај када је таласност струје већа од њене средње вредности.

Табела I Параметри дизајнираног спуштача напона

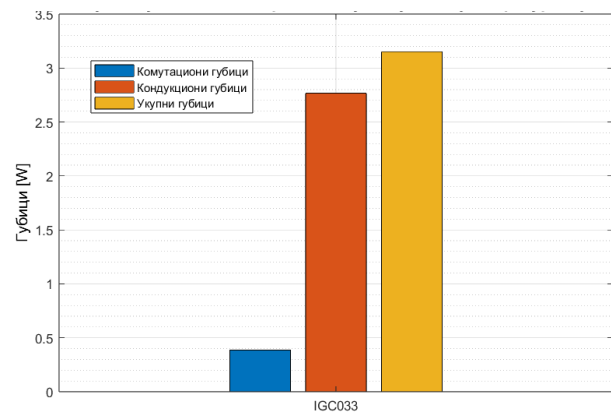
Параметар	Вредност	Јединица
Улазни напон	10–72	V
Изразни напон	5–70	V
Номинална снага	1	kW
Учестаност прекидања	125	kHz
Мртво време	25	ns
Пригушница	1,5	μH
Прекидач	GaN [10]	/
Упаљач	[11]	/



Слика 14. Укупни губици на оба прекидача у полумосној конфигурацији

Са графика се одмах примећује да су комутациони губици занемарљиво мали у односу на кондукционе губитке. У овом радном режиму излазна струја је приближно $I_L = 22 \text{ A}$, док је амплитуда таласности струје, максимална девијација у односу на средњу вредност, 27 A. Због овако велике таласности приликом гашења доњег прекидача струја је негативна и износи

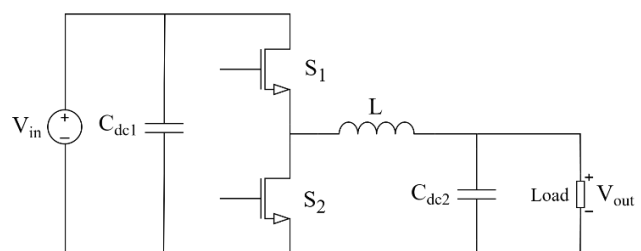
$I_{L_min} = -5 \text{ A}$. Тада се то искључење одвија по сценарију описаном у 2.2.1. Са Слике 3 може се уочити да је преклапање струје $I_{ch}(t)$ и напона $v_{ds}(t)$ врло мало, те су и губици дефинисани једначином (8) врло мали. После искључења доњег прекидача наступа период мртвог времена и укључење горњег прекидача. Укључење горњег прекидача се одвија по сценарију описаном у 2.3.1 и такође ствара минималне губитке. Битно је нагласити да када дође до комутације искључење горњег – укључење доњег, она се одвија поново по сценарију 2.2.1, па 2.3.1 и резултује минималним комутационим губицима. Комбинација комутације 2.2.1 и 2.3.1 може се остварити два пута током једне периоде само уколико је струја приликом укључења горњег прекидача негативна, то јест ако је таласност струје већа од струје потрошача I_L . Укупни губици на оба прекидача у случају када је таласност струје мања од струје потрошача I_L приказани су на Слици 15. Губици у овом случају су за 10% сада већи.



Слика 15. Укупни губици на оба прекидача у полумосној конфигурацији при тврдом комутавању

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

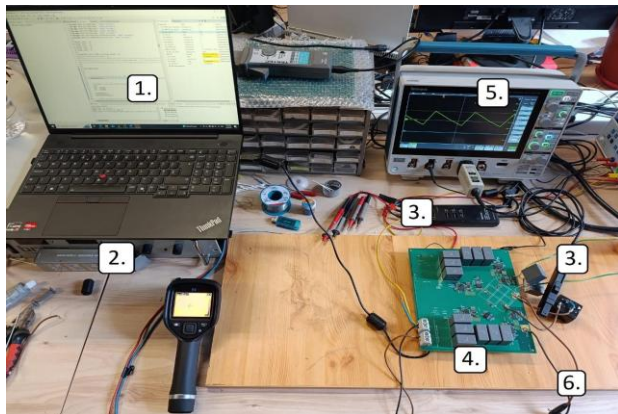
Како би се испитао и верификовао начињени аналитички модел, испројектован је претварач спуштач напона снаге 1 kW (Слика 16). Приликом пројектовања и израде прототипа, распореду компонената на штампаној плочи посвећена је посебна пажња како би се минимизирали паразитни елементи упаљачког кола и њихов утицај на прекидачки процес. Кључни подаци који описују прототип претварача дати су у Табели I. Валидација описаног модела комутација експериментално је вршена на поставци датој на Слици 17.



Слика 16. Топологија пројектованог спуштача снаге

Поставку чине:

- (1) лаптоп за комуникацију са претварачем у реалном времену;
- (2) енергетско напајање;
- (3) напонске и струјне сонде пропусног опсега до 150 MHz;
- (4) развијени прототип претварача;
- (5) осцилоскоп;
- (6) пасивни потрошач отпорности $R_L = 2 \Omega$.



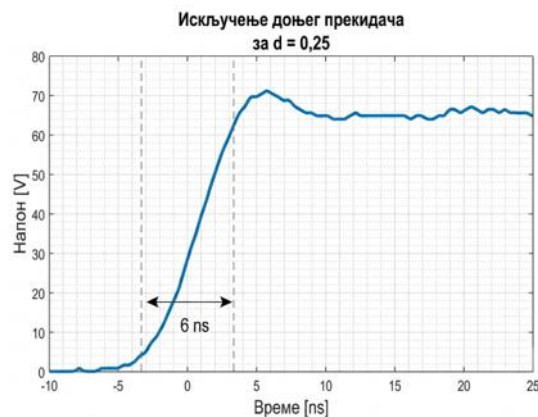
Слика 17. Експериментална поставка у Лабораторији за дигитално управљање претварачима и погонима Електротехничког факултета Универзитета у Београду

Постоји више начина за верификацију комутационог модела и алгоритма за оцену губитака. Један од приступа је мерење укупних губитака на нивоу целог претварача, након чега се врши њихова расподела на губитке у бакарним проводницима, реактивним елементима и помоћној електроници. Одузимањем ових компонената од укупне дисипације могуће је индиректно проценити губитке на прекидачима. Међутим, у дизајнираном претварачу прекидачки губици чине релативно мали удео у укупним губицима, што овај метод чини подложним значајним грешкама и одступањима.

Због тога је примењен други приступ – директна процена тачности комутационог модела кроз упоређивање таласних облика напона $v_{ds}(t)$ и струје $I_{ch}(t)$. Како су ове две величине уско повезане, добро поклапање таласних облика напона подразумева и добро поклапање струје, те самим тим и адекватну процену прекидачких губитака.

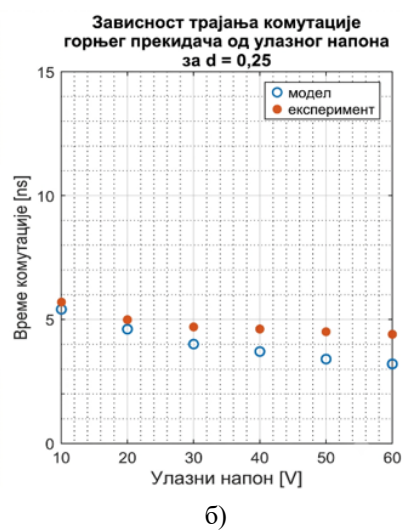
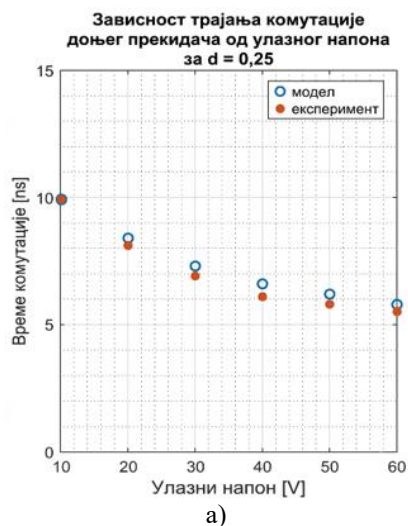
Извршен је низ експеримената у којима је улазни напон мењан у опсегу од $V_{in} \in [10, 60] V$ са кораком 10 V, док је истовремено фактор испуне узимао вредности од $d \in [0,25; 0,5; 0,75]$. Отпорност пасивног потрошача фиксирана је током свих експеримената и износи 2Ω .

Кључни параметар за верификацију развијеног модела је време трајања комутације. Трајање комутације испитивано је на поставци приказаној на Сlici 16 при различитим радним режимима и даље поређено са резултатима аналитичко-нумеричког модела. Уз помоћ осцилоскопа, измерено је време потребно напону $v_{ds}(t)$ да се промени са 0 V на V_{dc} , приликом искључења доњег прекидача (Слика 18).



Слика 18. Промена напона v_{ds} приликом искључења доњег прекидача

Измерена су времена трајања комутације за доњи и горњи прекидач за шест различитих улазних напона. Експериментални резултати су упоређени са временима трајања комутације добијених из модела у целом радном опсегу напона претварача. Добијени резултати представљени су на Сlici 19.



Слика 19. Зависност дужине трајања комутације од улазног напона: а) доњег прекидача; б) горњег прекидача у полумосту

Са Сликe 19 може се закључити да развијени модел прилично добро прати експерименталне вредности, нарочито у случају доњег прекидача. На напону од 10 V модел показује готово идеално поклапање са мерењима, са тачношћу од 99%. Међутим, како се улазни напон повећава, уочава се одређено одступање модела, при чему је највећа разлика уочена на 40 V, где тачност опада на 92%.

С друге стране, резултати за горњи прекидач показују нешто слабије поклапање са експериментом. Тачност модела опада са порастом улазног напона, достижући 75% на 60 V. Ово може указивати на додатне нелинеарне ефекте или асиметрију у утицају паразитних елемената који нису у потпуности обухваћени тренутним моделом. Упркос одступањима, модел показује задовољавајућу тачност, што га чини корисним алатом за процену времена комутације и оцену губитака на прекидачима.

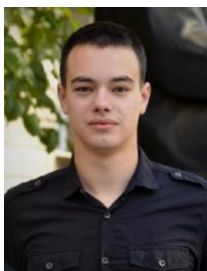
5. ЗАКЉУЧАК

У раду су детаљно описани процеси комутација GaN прекидача у полумосној конфигурацији. Изведен је физички модел комутација чији су излазни параметри временски облик струје канала $I_{ch}(t)$ и временски облик пада напона на каналу $v_{ds}(t)$. Параметри од интереса описани су у функцији радних режима. Како би изведене једначине биле решиве без икаквог увођења апроксимација, уз помоћ одговарајућег софтверског пакета, извучени су релевантни подаци из техничке документације конкретног прекидача. Тако извучени подаци искоришћени су приликом дискретног решавања једначина претходно описаног физичког модела. За потребе верификације формираног аналитичко-нумеричког модела, развијен је и испитан прототип претварача спуштача напона заснован на GaN технологији. Испитивања су спроведена у целом опсегу радног напона и поређена су трајања времена комутације којима резултују модел и експериментална поставка. Модел показује веома добро поклапање од преко 92% са експерименталним испитивањима трајања комутације GaN прекидача. Највећа одступања између резултата добијених аналитичко-нумеричким моделом и експериментално измерених времена комутације на прототипу достижу до 25% за горњи прекидач, што указује на присуство одређених ефеката који нису у потпуности обухваћени моделом и оставља простор за даља истраживања.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lidow A., De Rooij M., Glaser J., „GaN Power Devices for Efficient Power Conversion”, четврто издање књиге, Wiley, Hoboken, 2025.
- [2] Spaziani L., Lu L., „Silicon, GaN and SiC: There's Room for All: An Application Space Overview of Device Considerations”, *2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Chicago, IL, USA, 2018, pp. 8-11, DOI: 10.1109/ISPSD.2018.8393590.
- [3] Ding X., Zhou, Y., Cheng, J., „A Review of Gallium Nitride Power Device and its Applications in Motor Drive” *Proceedings of the CSEE*, vol. 41, no. 4, pp. 1386–1397, April 2021.
- [4] Klein J., „Synchronous Buck MOSFET Loss Calculations with Excel Model” [Internet]. Sunnyvale: Fairchild Semiconductor; 2006 [цитирано 5. 1. 2026]. Доступно на: <https://www.bdtic.com/datasheet/fairchild/AN-6005.pdf>.
- [5] Huang X., Li Q., Liu Z., Lee F. C. „Analytical Loss Model of High Voltage GaN HEMT in Cascode Configuration” *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, CO, USA, 2013, pp. 3587-3594, DOI: 10.1109/ECCE.2013.6647173.
- [6] Erickson R., Maksimovic D., „Fundamentals of Power Electronics”, Springer Science & Business Media, New York, 2007.
- [7] Qin, H., Zheng, X., Zhu Z., and Gong, C., „Analytical Power Loss Model for GaN Transistors Based on Temperature and Parasitic Parameters”, *Proceedings of 7th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE)*, Los Angeles, CA, USA, 2024, pp. 119-124, DOI: 10.1109/CEEGE62093.2024.10744178.
- [8] AutomerisRohatgi, A. (2025). WebPlotDigitizer. [Softverski paket]. <https://automeris.io>.
- [9] The MathWorks, Inc. (2024). MATLAB (R2024a) [Софтверски пакет]. <https://www.mathworks.com>.
- [10] Infineon Technologies, „IGC033S101 Datasheet”, Rev. 1.0, 2025. [Полупроводничка компонента]. Доступно на: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-igc033s101-datasheet-en.pdf>
- [11] Infineon Technologies, „2EDB8259F Datasheet”, Rev. 1.0, 2024. [Полупроводничка компонента]. Доступно на: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-2edb8259f-datasheet-en.pdf>

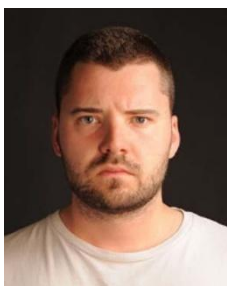
БИОГРАФИЈЕ



Мирослав Поповић је рођен 2001. године у Београду, у Србији. Дипломске и мастер студије завршио је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2024. и 2025. године, редом. Тренутно је на докторским студијама на истом факултету. Са тимом H-Bridges 2023. године

освојио је друго место на међународном такмичењу IFEC (*International Future Energy Challenge*) у Хановеру, у Немачкој. Области његовог истраживања обухватају полупроводнике великог енергетског процепа и дизајн претварача снаге.

ORCID: 0009-0009-5388-8932



Александар Р. Милић је рођен у Смедереву, у Југославији, 1993. године. Диплому основних и мастер академских студија из електротехнике стекао је на Универзитету у Београду 2016. и 2017. године, редом. Тренутно је запослен на Катедри за енергетске претварааче и погоне на Електротехничком факултету

Универзитета у Београду. Његова истраживачка интересовања обухватају дигитално управљање електричним погонима и мрежним претвараачима. Од 2017. до 2025. године, као ментор студентског тима H-Bridges, добио је шест награда на такмичењу IEEE-a *International Future Energy Challenge*.

ORCID: 0000-0003-2675-4292



Никола Мирковић је рођен у Београду, у Србији, 1997. године. Диплому основних и мастер академских студија из електротехнике стекао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2020. и 2021. године, редом. Докторат из области индустријске електронике на *Centro de Electrónica Industrial, Universidad Politécnica de Madrid*, Мадрид, Шпанија, одбранио је у априлу 2025. године. Од 2021. године члан је *Centro de Electrónica Industrial, Universidad Politécnica de Madrid* (UPM). Области његовог истраживања обухватају индуктивни пренос енергије и претварааче снаге.

ORCID: 0000-0003-0018-4682

Miroslav Popovic¹, Aleksandar Milic¹, Nikola Mirkovic²

Loss Modeling of GaN Transistors Using Datasheet Data

¹ University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia*² University of Belgrade – Institute Nikola Tesla, Belgrade, Serbia

Original scientific research article

Highlights

- Development of a loss-estimation algorithm for GaN power transistors
- Comparison of hard, soft, and semi-soft switching processes, with separation of channel current and parasitic capacitance contributions
- Validation of the model through a 1 kW synchronous buck converter prototype

Abstract

Transistors based on modern wide-bandgap semiconductors, such as Gallium Nitride (GaN), are increasingly used in power electronics devices. Due to their specific structure and ability to rapidly switch states, standard calculations used for determining losses in silicon transistors are not applicable in this case. Therefore, an analytical model has been developed to estimate losses in GaN transistors in a half-bridge configuration, relying on data from technical documentation. The model considers different types of switching, including hard, soft, and semi-soft switching. A comparison of losses during soft and hard switching of transistors in a synchronous buck converter under the same operating conditions has been conducted. Finally, the proposed model has been verified through the design of a 1 kW buck converter.

Keywords

GaN transistors, loss model, synchronous buck converter

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the student paper “Analytical Loss Model of GaN Transistors Based on Datasheet Data” (<https://doi.ub.bg.ac.rs/doi/cigre37-b4-05/>), awarded in the Expert Committee EC-B4 HVDC and Power Electronics, at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, 26-30 May 2025.

Received: December 16th, 2025Reviewed: July 3rd, 2026Modified: July 8th, 2026Accepted: July 22nd, 2026

* Corresponding author: Miroslav Popovic

E - mail: miroslav@etf.bg.ac.rs

УДК: 621.311.1:621.318.43
621.316.542:621.3.015.3Урош Н. Његован^{1,2}, Зоран Н. Стојановић¹, Александар Д. Марјановић^{1,3}

Ограничење склопних транзијената применом технике контролисаног укључења прекидача (Point-on-Wave)

¹ Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, Београд, Србија*² Siemens Energy д. о. о. Београд – Београд, Србија³ Siemens д. о. о. Београд – Београд, Србија<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.5>

Оригинални научно-истраживачки рад

Кључне поруке

- Представљени ефекти склопних транзијената услед прикључења различитих врста оптерећења
- Описана техника контролисаног укључења прекидача
- Ефекти примене технике тестирани на симулатору у реалном времену
- Извршено поређење са конвенционалним укључењем прекидача компензационе пригушнице

Кратак садржај

Подоптерећена преносна мрежа, односно водови оптерећени испод своје природне снаге, значајан су извор реактивне снаге са последицом локалног повећања напона. Као средство регулације напонских прилика операторима преносног система широм света наметнула се употреба паралелно прикључене пригушнице (енгл. Shunt Reactor) у комбинацији са конвенционалним високонапонским прекидачем. Имплементација оваквог решења доводи до значајног пораста броја склопних транзијената. Применом технике контролисаних операција прекидача (Point-on-Wave), кроз појединачно укључење/искључење сваког пола прекидача у најповољнијем тренутку, у великој мери се могу ограничити вредности ударне струје укључења пригушнице и повратног напона при искључењу. У раду су представљени негативни ефекти неконтролисаног прикључења паралелних пригушница на преносни систем. Описана је техника контроле тренутка укључења прекидача као мера ограничавања негативних утицаја склопних транзијената. Функција контроле прекидача и потенцијални ефекти примене у преносној мрежи су тестирани у лабораторијским условима. Лабораторијска поставка се састоји од микропроцесорског уређаја за заштиту и управљање као контролера и симулатора у реалном времену (HIL – Hardware-in-the-Loop) на коме је реализован модел 400 kV паралелне пригушнице и прекидача. Уређаји комуницирају коришћењем IEC 61850 Sampled Values и GOOSE протокола. Добијени резултати потврђују скоро потпуну елиминацију ударног периода приликом укључења компензационе пригушнице.

Кључне речи

Компензациона пригушница, контролисано укључење прекидача, симулација *Hardware-in-the-Loop*, ударна струја пригушнице

Примљено: 26. децембар 2025. Рецензирано: 19. март 2026.
Измењено: 6. мај 2026. Одобрено: 12. мај 2026.

*Кореспондирајући аутор: Урош Н. Његован, +381 60/81-70-242

Имејл: uros.njegovan@siemens-energy.com

Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Примена технике контролисаног укључења прекидача (Point on Wave) на примеру компензационе пригушнице 400 kV у мрежи” (<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.5>), награђеног у Студијском комитету СТК-Б5 Заштита и аутоматизација, на 37. Саветовању CIGRE Србија, Златибор, 26-30. маја 2025.

1. УВОД

Склопни транзијенти представљају један од главних узрока прекомерног напрезања опреме електроенергетског система (ЕЕС). На пример, укључење компензационе пригушнице може довести до изобличења таласних облика напона и појаве ударних струја велике амплитуде, док укључење кондензаторских батерија може бити праћено прекомерним повећањем напона. Техника контролисаног укључења/искључења прекидача примењује се у циљу ограничавања и елиминације склопних транзијената који су последица укључења или искључења компензационих пригушница, енергетских трансформатора и кондензаторских батерија. Поменута техника последњих година бележи пораст примене на надземним и кабловским водовима високог напона.

Комбинација високонапонских (ВН) прекидача са стабилним оперативним карактеристикама и савремених микропроцесорских уређаја довела је до усавршавања алгорита контролера прекидача, поједноставила њихову интеграцију у примарним и секундарним колима и омогућила примену на различитим врстама оптерећења. Услед значајног пораста њене примене претходних година постала је препозната као поуздано средство ограничења ефеката склопних транзијената.

Контролер оптимизује тренутак операције ВН прекидача увођењем одговарајућег кашњења извршења команде у зависности од врсте оптерећења. На тај начин, тежи се ограничењу негативних утицаја склопних операција у ЕЕС-у. Основне предности примене модерних контролера су, [1]:

- повећање поузданости ЕЕС-а као резултат ограничења варијације напона и редукције виших хармоника;
- побољшање квалитета електричне енергије;
- продужетак животног века опреме;
- ограничење амплитуде пренапона и ударне струје магнетнећа.

1.1 Укључење прекидача компензационе пригушнице

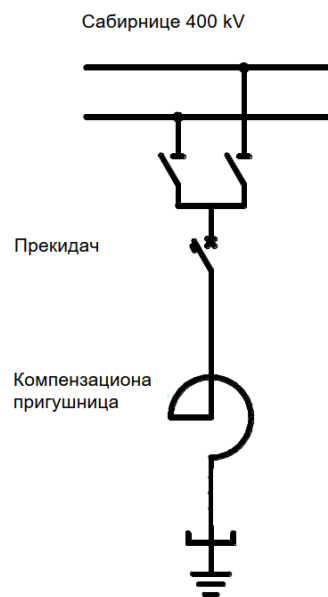
Напони потрошачких чворова, заједно са фреквенцијом и степеном хармонијских изобличења, представљају основне показатеље квалитета електричне енергије. Код подоптерећених преносних мрежа до изражаја долазе капацитивности дугачких високонапонских водова који постају значајан извор реактивне снаге са последицом локалног повећања напона изнад максимално дозвољених вредности. Подоптерећени 400 kV и 220 kV водови честа су појава како у Србији тако и у региону.

Посматрано са аспекта ЕЕС-а у целини, напонске прилике су локалног карактера, па се у великом броју случајева не могу регулисати системски, односно без употребе додатних компензационих елемената.

Тренутно постоји широк спектар доступних технологија компензације реактивне снаге, као што су синхрони компензатори, компензационе пригушнице (*Shunt Reactor*), статички VAR компензатори (SVC), статички синхрони компензатори (STATCOM), комбиновани серијско-паралелни FACTS контролери UPFC (Unified Power Flow Controller) и IPFC (Interline Power Flow Controller), као и FACTS контролери комбиновани са трансформаторима, попут TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer) и TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulator).

Паралелно прикључена компензациона пригушница представља једно од најзаступљенијих средстава компензације реактивне снаге које данас примењују оператори преносног система широм света. Користи се у појединим чвориштима мреже како би се одржао жељени напонски профил у ЕЕС-у. Граде се као монофазне или трофазне јединице са регулационим отцепима или без регулационих отцепа (неуправљиве). На мрежу се прикључују или директно на сабирнице ВН постројења преко конвенционалних прекидача (Слика 1) или преко терцијера мрежних трансформатора.

У периодима високих оптерећења у ЕЕС-у и повећаног преноса електричне енергије високонапонским водовима пригушнице је најчешће потребно одвојити са мреже. У зависности од варијација напона и учесталости склопних операција ВН прекидача компензационе пригушнице, може доћи до значајног пораста броја склопних транзијената на месту њеног прикључења. Овакви транзијенти представљају један од главних узрока прекомерног напрезања опреме преносног система, пре свега прекидача, док додатно имају негативан утицај на квалитет електричне енергије и могу довести до непотребних реаговања уређаја релејне заштите.

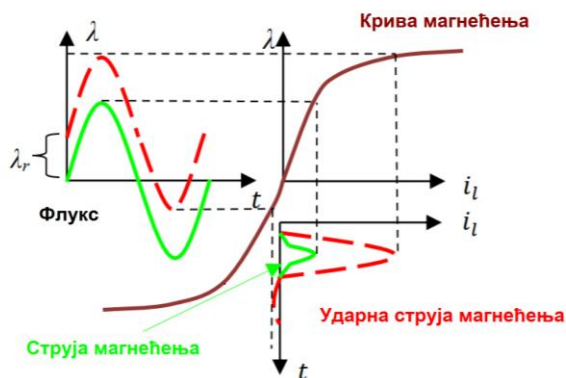


Слика 1. Директно прикључење компензационе пригушнице на сабирнице постројења ВН

1.2 Укључење прекидача енергетског трансформатора

Енергетски трансформатори играју једну од кључних улога у поузданом раду ЕЕС-а. Услед значајног пораста захтева за непрекидном испоруком електричне енергије претходних деценија постављени су високи критеријуми поузданости рада енергетских трансформатора (у даљем тексту трансформатор).

Ударна струја магњења трансформатора (Слика 2), [2], појава је која настаје приликом укључења неоптерећеног трансформатора. У одређеним случајевима она може достићи вредности блиске струји кvara, [3]. Њен утицај је мање изражен у поређењу са струјом кvara, али учесталост њене појаве и дужина трајања могу имати негативан утицај на животни век ВН опреме. Осим велике амплитуде ударне струје, укључење трансформатора може бити праћено појавом виших хармоника, има негативан утицај на квалитет електричне енергије и може довести до непотребних реаговања уређаја релејне заштите.



Слика 2. Струја магњења енергетског трансформатора

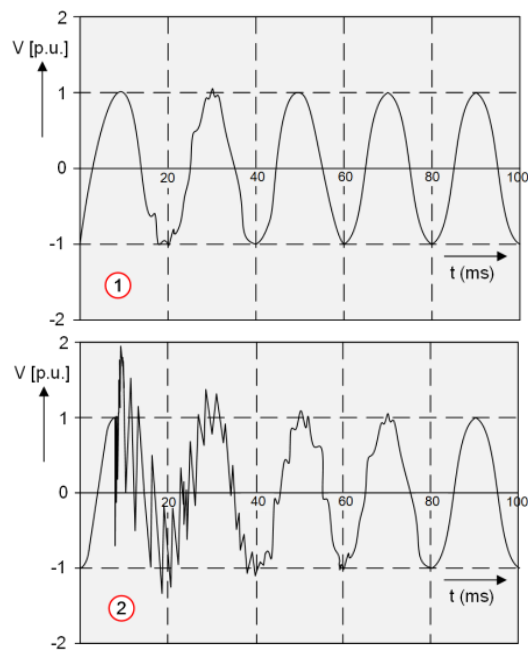
У устаљеном радном режиму трансформатора у празном ходу сав флуks се затвара у његовом магнетском језгру, стога је потребна мала струја магњења, као што је приказано на Сlici 2. Она типично износи 1-2% називне струје трансформатора. Из економских разлога, трансформатори се конструишу тако да вредност радног флуksа одговара тачки блиској колену карактеристике магњења. Конвенционално укључење прекидача трансформатора у насумичном тренутку може довести до несиметричног магнетског флуksа и засићења језгра. Важно је напоменути да се приликом искључења трансформатора у његовом магнетском језгру задржава део флуksа, познат као реманенти, односно заостали флуks (λ_r). Он може имати утицај на амплитуду ударне струје магњења приликом наредног укључења трансформатора у зависности од вредности напона у тренутку укључења. С обзиром на то да трансформатори представљају важан елемент ЕЕС-а и да прекид њиховог рада може бити критичан у тренуцима високог оптерећења ЕЕС-а, значајан корак ка могућем продужењу животног века може се постићи контролисањем тренутка њиховог укључења.

1.3 Укључење прекидача кондензаторских батерија

Када се прекидач кондензаторских батерија или хармонијског филтера искључи, потребно је одређено време да се заостала енергија акумулирана у батерији испразни. Како би се избегло поновно укључење прекидача пре потпуног пражњења батерије, обично се примењује временски релеј са циљем да одређени временски период блокира механизам прекидача. Уграђени отпорници за пражњење ће осигурати да се батерија испразни пре него што истекне време блокаде прекидача. Типично подешавање временског релеја износи 10 минута од тренутка искључења прекидача до првог наредног дозвољеног укључења.

Испражњене кондензаторске батерије краткотрајно представљају кратак спој у тренутку успостављања напона на њиховим прикључцима, односно укључења прекидача. Уколико до укључења дође приликом максималне вредности напона, варијације напона и струје могу бити значајне. У зависности од конфигурације мреже, пренапони који могу настати приликом укључења кондензаторских батерија могу довести до оштећења, па чак и пробоја изолације појединих елемената електроенергетског система, као што су трансформатори, изолатори, каблови и др. Код одређене конфигурације кондензаторских батерија укључење може бити праћено струјама високе амплитуде и фреквенције. У екстремним случајевима то може угрожити механички интегритет како кондензаторске батерије тако и прекидача.

Поменути транзијенти се могу значајно ограничити контролисањем прекидача кондензаторских батерија тако да до укључења дође при нултом напону (Слика 3), [4].



Слика 3. Таласни облик напона контролисаног (горе) и неконтролисаног (доле) укључења кондензаторских батерија

2. ТЕХНИКА КОНТРОЛЕ ТРЕНУТКА УКЉУЧЕЊА ПРЕКИДАЧА

Једна од најзаступљенијих технологија контроле прекидача заснована је на одабиру оптималног тренутка на напонском таласу (*Point-on-Wave*). Оваквим укључењем значајно се могу редуковати нежељени ефекти склопних транзијената који могу настати у случају конвенционалног укључења у насумичном тренутку. Алгоритам који одређује најповољнији тренутак укључења сваке од фаза на основу улазних величина имплементиран је у контролеру прекидача, који је по својим карактеристикама сличан савременим микропроцесорским уређајима за релејну заштиту и управљање.

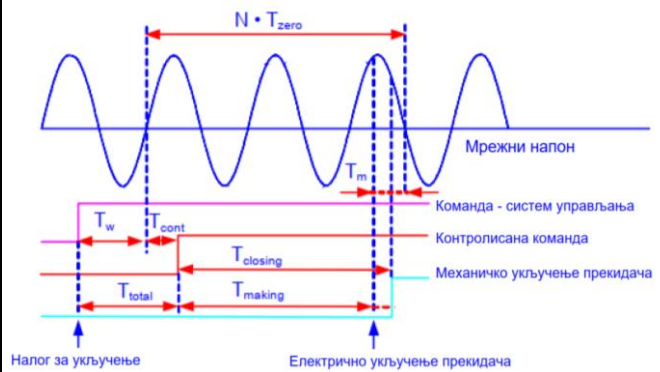
Његова улога се огледа у томе да након пријема налога за укључење прекидача процени оптималан тренутак укључења на основу мереног напонског таласа и сходно томе израчуна потребно временско кашњење извршења команде како би се сваки пол прекидача независно укључио у оптималном тренутку. Очекивана поновљивост контролера и прецизност успостављања струје у односу на оптималну тачку на напонском таласу је ± 1 ms. Алгоритам контролера проверава сва одступања у фреквенцији референтног напона детекцијом проласка сигнала напона кроз нулу (*zero crossing*) и на основу тога доноси коначну одлуку о тренутку извршења команде.

Принцип контролисаног укључења са свим кључним временским тренуцима од интереса приказан је на Слици 4, [5]. Може се уочити да, пре успостављања механичког контакта полова прекидача, односно његовог механичког укључења, долази до диелектричног пробоја изолационог медијума када се контакти прекидача довољно приближе и успоставља се електрични лук. То представља електрични контакт полова, односно електрично укључење прекидача. Време механичког укључења (T_{CLOSING}) карактеристика је прекидача и може се измерити. Време паљења лука (T_m) представља улазни параметар контролера на основу кога се израчунава укупно време које је потребно да прође од тренутка издавања команде до успостављања струје, односно електричног укључења прекидача (T_{MAKING}).

Укупно временско кашњење које контролер уноси од момента детекције налога за укључење до извршења команде (T_{total}) представља збир времена детекције проласка сигнала напона кроз нулу (T_w) и синхроног кашњења које рачуна контролер (T_{cont}). Синхроно временско кашњење се уводи са циљем успостављања струје у оптималном тренутку у односу на напонски талас, односно узима се у обзир рачунато време електричног укључења прекидача (T_{MAKING}).

Стога, улога контролера је иницирање успостављања електричног а не механичког контакта полова прекидача у оптималном тренутку, које се рачуна као (1):

$$T_{\text{MAKING}} = T_{\text{CLOSING}} - T_m \quad (1)$$



Слика 4. Кључни временски тренуци контролисаног укључења прекидача

Велики утицај на ефекат контролисаног укључења имају доследност механичких перформанси прекидача и његове диелектричне карактеристике. Поред тога, значајан фактор представља и способност контролера да прецизно предвиди понашање прекидача током његовог радног века.

Потребне карактеристике прекидача за примену у шемама контролисаног укључења су:

- независно управљање половима;
- стабилно време укључења уз механичку поузданост;
- изванредне диелектричне особине, тј. стрма стопа опадања диелектричне чврстоће (RDDS).

Наиме, оперативна времена прекидача значајно варирају зависно од типа прекидача, као и радних и амбијенталних услова. Део укупне варијације времена прекидача се може предвидети. Осим предвидљивих, постоје и варијације које није могуће предвидети, јер су чисто статистичке природе. Оперативно време прекидача се може представити следећим изразом (2):

$$T_{\text{Oper}} = T_{\text{Nom}} + \Delta T_{\text{Comp}} + \Delta T_{\text{Drift}} + \Delta T_{\text{Statistic}} \quad (2)$$

где је:

- T_{Oper} – оперативно време прекидача;
- T_{Nom} – називно време прекидача при номиналним условима;
- ΔT_{Comp} – предвидљиво одступање које контролер може компензовати;
- ΔT_{Drift} – одступање услед експлоатације прекидача током његовог радног века;
- $\Delta T_{\text{Statistic}}$ – статистичко одступање.

Дакле, постоји варијабилни део оперативног времена прекидача који се може предвидети и уважити у самом контролеру (ΔT_{Comp}). Промена оперативног времена прекидача узрокована је променама вредности контролног напона и амбијенталне температуре, а у случају пнеуматских прекидача, и променом притиска. Стога се ове

варијације могу предвидети, а на основу величина измерених путем сензора и достављених контролеру могуће је компензовати њихов утицај на оперативно време прекидача.

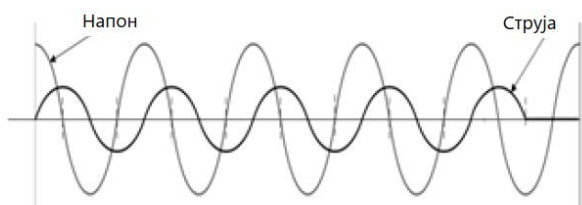
3. СТРАТЕГИЈА КОНТРОЛИСАНОГ УКЉУЧЕЊА У ЗАВИСНОСТИ ОД ОПТЕРЕЋЕЊА

У наредним поглављима дат је преглед стратегија контролисаног укључења прекидача за три основна типа оптерећења. У зависности од очекивања корисника и доступних функционалности контролера, могуће је конфигурирати га за неки од стандардних типова оптерећења и, уколико је потребно, за оба смера рада – укључење и искључење.

3.1 Контролисано укључење прекидача компензационе пригушнице

У случају идеалне компензационе пригушнице таласни облик струје заостаје приближно 90° у односу на напон на њеним прикључцима, [6]. На тај начин тренутна вредност напона достиже максимум у тренутку проласка струја кроз нулу, као што је приказано на Сlici 5.

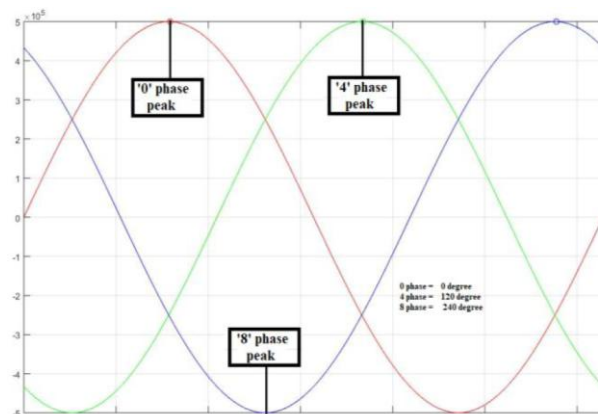
Амплитуда ударне струје пригушнице и степен изобличења напонског таласа зависе од вредности напона мреже у тренутку издавања налога за укључења и оперативног времена прекидача.



Слика 5. Таласни облик струје и напона компензационе пригушнице

Конвенционално укључење компензационе пригушнице у насумичном тренутку доводи до појаве несиметричних струја, повећања електромеханичких напрезања прекидача и намотаја пригушнице, док у екстремним случајевима може довести до zasiћења струјних трансформатора и непотребног реаговања земљоспојне заштите (50N/51N), која је заснована на мерењу струје проводника неутралне тачке пригушнице. Уколико до укључења дође у тренутку када је вредност напона у једној од фаза блиска нули, склопни транзијент ће бити најизраженији.

У случају трофазних система максимуми вредности сигнала фазних напона су увек инверзног редоследа (L1-L3-L2) у односу на фазни редослед напона мреже (L1-L2-L3) и међусобно померени за трећину периоде, односно 6,66 ms код система називне фреквенције 50 Hz (Слика 6).



Слика 6. Таласни облик три фазна напона и њихови максимуми

Оптимална стратегија укључења пригушнице се заснива на укључењу сваког пола прекидача при максималној вредности напона. Пошто је пригушница индуктиван елемент, приликом укључења прекидача при максималној вредности напона ниво магнетског флуksа је теоријски минималан, па се самим тим ограничава и вредност ударне струје. Референтни тренутак је пролазак таласног облика напона фазе L1 кроз нулу (*zero crossing*). Циљ контролера је да обезбеди укључење пола L1 са фазним померајем од 90° у односу на референтни тренутак, односно у моменту када вредност напона фазе L1 достигне свој максимум [7].

Свој максимум (са негативним предзнаком) следећа достиже фаза L3 за $90^\circ + 60^\circ = 150^\circ$ односно са кашњењем од 3,33 ms у односу на фазу L1. Последњи корак је укључење фазе L2, и то са теоријском задршком од $90^\circ + 120^\circ = 210^\circ$, односно 6,66 ms.

Важно је напоменути, иако није предмет овог рада, да искључење прекидача пригушнице такође може представљати изазов. Узрок томе није амплитуда струје која се прекида већ енергија акумулирана у пригушници. „Одсецање” струје пре њеног проласка кроз нулу може довести до изражених високофреквентних осцилација узрокованих енергијом акумулираном у пригушници као индуктивном елементу, као и паразитних капацитивности.

Нагли пораст повратног напона на контактима прекидача може довести до поновног паљења лука. Неопходно је истаћи да су савремени SF₆ прекидачи конструисани тако да је вероватноћа „одсецања” струје минимална.

Улога контролера приликом искључења прекидача пригушнице огледа се у иницирању механичког одвајања контаката непосредно након проласка струје кроз нулу. Након механичког одвајања контаката прекидача, долази до развлачења лука и струја наставља да тече све док диелектрична чврстоћа не буде довољна да приликом наредног проласка струје кроз нулу угуши лук. Када се лук угаси, требало би да контакти прекидача буду довољно удаљени један од другог да диелектрична чврстоћа надјача повратни напон и не дође до поновног паљења лука.

3.2 Контролисано укључење прекидача енергетског трансформатора

Код трофазних трансформатора који су формирани од три монофазне јединице не постоји магнетска спрега између фаза једног намотаја, па се са аспекта стратегије укључења могу посматрати као компензационе пригушнице, односно тежи се укључењу сваке фазе при максимуму одговарајућег напона.

На нашим просторима преовладавају трофазни трансформатори са заједничким магнетским језгром и кућиштем, код којих примарни и секундарни намотај могу бити спрегнути у звезду (уземљена или изолована неутрална тачка) или троугао. У појединим случајевима трансформатори садрже и терцијерни намотај. Уколико трансформатор поседује терцијер или је конструисан као трофазна јединица са заједничким језгром, тада постоји магнетска спрега између његових фаза, што се одражава и на стратегију његовог оптималног укључења.

У Табели I дат је преглед оптималних тренутака укључења појединачних фаза прекидача трансформатора у зависности од спреге и начина уземљења неутралне тачке примарног намотаја. Жељени тренутак укључења приказан је у форми фазног става (угла) сваке од појединачних фаза у односу на референтни тренутак, односно пролазак сигнала напона фазе L1 кроз нулу. Стратегија укључења подразумева енергизацију намотаја који је први наведен у табели.

Описана техника укључења заснована је на мерењу референтног напона и не узима у обзир реманентни флуks трансформатора.

Табела I Оптималан тренутак укључења у зависности од спреге трансформатора

Спрега трансформатора	Фаза L1 [°]	Фаза L2 [°]	Фаза L3 [°]
YNd; YNyn	90	180	180
Yd; Yy; Dd; Dyn; Dy	60	60	150

3.2.1 Трансформатор са уземљеном неутралном тачком (YNd; YNyn). У наставку је описана стратегија укључења трансформатора чији је намотај који се енергизује спрегнут у звезду, са уземљеном неутралном тачком. При таквој конфигурацији, прво се укључује фаза L1 и то при максималној вредности њеног напона, када је ниво флуksа најмањи. У поменутој фази се успоставља струја магнетизације која се затвара преко уземљења неутралне тачке намотаја. Струја магнетизације у фази L1 доводи до индукције симетричног флуksа у преосталим фазама (L2 и L3), чија је вредност једнака половини вредности флуksа фазе L1 и супротног је поларитета. Због тога успостављена струја магнетизације у фази L1 има 1,5 пута већу вредност од струје магнетизације у устаљеном режиму када су све три фазе укључене.

Преостале две фазе потребно је укључити истовремено са померајем од 90° у односу на прву. То је тренутак када магнетски флуks фазе L1 достиже максималну вредност, а флуks индукован у фазама L2 и L3 достиже вредности потенцијалног флуksа који би у њима проузроковао мрежни напон у датом тренутку. Иако се укључење фаза L2 и L3 не остварује при максимуму одговарајућих мрежних напона, тренутак укључења одговара максимуму магнетског флуksа који у тим фазама индукује фаза L1.

3.2.2 Трансформатор са изолованом неутралном тачком (Yd; Yy; Dd; Dyn; Dy). У случају трансформатора са изолованом неутралном тачком, укључењем само једне фазе не може се успоставити струја магнетизације због изоловане неутралне тачке или спреге намотаја у троугао (D). Стога се фазе L1 и L2 укључују истовремено, при максималној вредности међуфазног напона U_{L1-L2} , односно са померајем од 60° у односу на референтни тренутак (пролазак напона фазе L1 кроз нулу). У тренутку укључења амплитуда флуksа фаза L1 и L2 једнака је нули. Напон фазе L3 достиже свој максимум са кашњењем од 90° ($60° + 90° = 150°$ у односу на референтни тренутак). Њеним укључењем у овом тренутку постиже се укључење при минималном флуksу.

3.3 Контролисано укључење прекидача кондензаторске батерије

Када се на испразњену кондензаторску батерију, као елемент мале импедансе, доведе напон у тренутку његове максималне вредности, долази до израженог прелазног процеса у виду пренапона и ударних струја високе амплитуде.

Да би се постигла најмања разлика потенцијала приликом контролисаног укључења, оно се треба обавити што ближе проласку напона сваке од фаза кроз нулу. У Табели II дат је приказ оптималних тренутака укључења појединачних фаза прекидача у зависности од начина уземљења неутралне тачке кондензаторских батерија.

Табела II Оптималан тренутак укључења у зависности од начина уземљења кондензаторских батерија

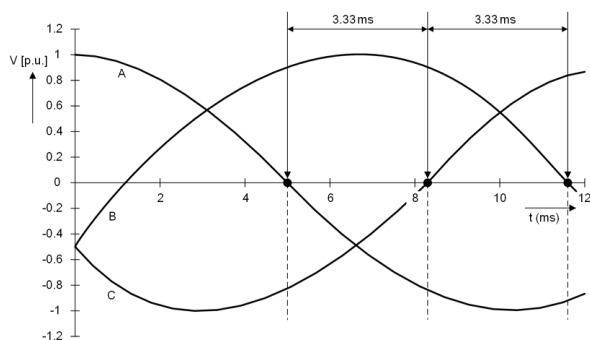
Неутрална тачка кондензаторске батерије	Фаза L1 [°]	Фаза L2 [°]	Фаза L3 [°]
Уземљена	0	120	60
Изолована	180	90	90

3.3.1 Кондензаторска батерија са уземљеном неутралном тачком. У случају кондензаторских батерија са уземљеном неутралном тачком свака фаза се укључује независно, при проласку њеног напона кроз нулу (Слика 7). Тренуци проласка таласних облика напона кроз нулу међусобно су померени за 60°.

Редослед укључења полова прекидача приказан на Слици 7 је L1-L2-L3, са временским померајем од 3,33 ms за 50 Hz, односно 2,77 ms за 60 Hz системе.

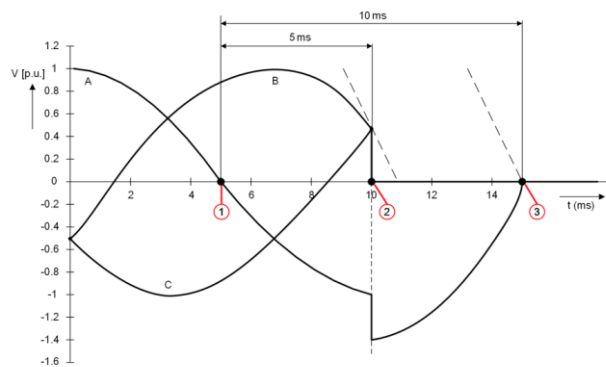
3.3.2 Кондензаторска батерија са изолованом неутралном тачком. У случају кондензаторских батерија са изолованом неутралном тачком укључење при проласку напона кроз нулу се другачије интерпретира у погледу редоследа извршења команди у поређењу са кондензаторским батеријама код којих је неутрална тачка уземљена.

Уместо да се свака фаза укључи независно, у тренутку проласка фазног напона кроз нулу, две фазе се укључују истовремено (Слика 8), у тренутку када су њихови напони међусобно једнаки. То је моменат када је међуфазни напон U_{L2-L3} једнак нули, што резултује укључењем фаза L2 и L3 кондензаторских батерија при нултом напону.



Слика 7. Оптималне тачке укључења кондензаторске батерије са уземљеном неутралном тачком

Затим, четвртину периоде касније, фаза L1 се укључује у тренутку проласка њеног напона кроз нулу.



Слика 8. Оптималне тачке укључења кондензаторске батерије са изолованом неутралном тачком

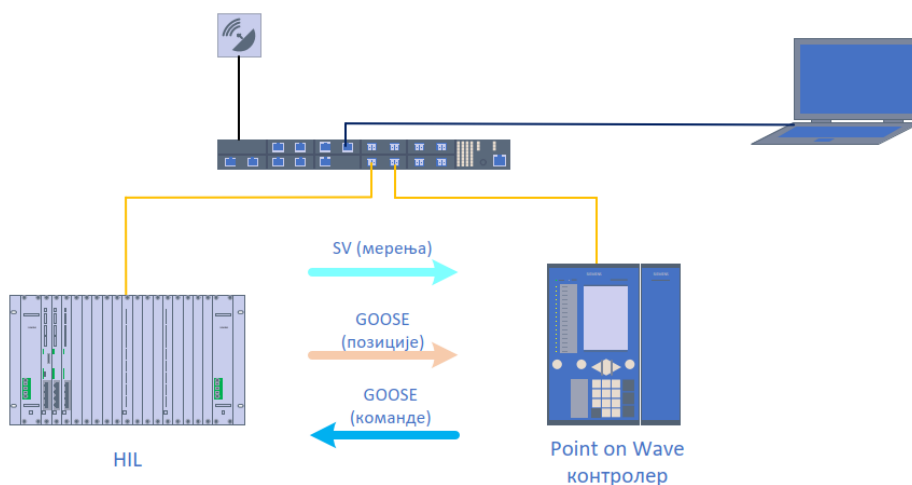
Временски тренуци од значаја, означени бројевима на Слици 8, представљају:

1. референтни тренутак контролера – пролазак напона фазе L1 кроз нулу;
2. тренутак укључења фаза L2 и L3;
3. тренутак укључења фазе L1.

4. ЛАБОРАТОРИЈСКИ МОДЕЛ

Ефекти примене технике контролисаног укључења прекидача испитани су у лабораторијским условима, на примеру компензационе пригушнице 400 kV. У ту сврху формирана је лабораторијска поставка (Слика 9) коју чине: микропроцесорски уређај за релејну заштиту и управљање као контролер прекидача, мрежни комуникациони свич и Hardware-in-the-Loop (HIL) уређај, на коме је реализован модел компензационе пригушнице 400 kV, прекидача ВН и дела остатка мреже.

Процесна мрежа (према стандарду IEC 61850) на моделу је упрошћена, реализована у топологији „звезда“, са једним мрежним комуникационим свичем. Комуникациони свич има улогу и извора временске синхронизације по протоколу IEEE 1588 *Precision Time Protocol* – РТР, који је неопходан за генерисање валидних одбирака мерних величина – *Sampled Values*.



Слика 9. Блок-шема лабораторијске поставке

4.1 Модел компензационе пригушнице

У оквиру HIL уређаја моделовано је поље 400 kV које се састоји од компензационе пригушнице, прекидача, струјних мерних трансформатора и остале релевантне ВН опреме. Компензациона пригушница је нелинеарна, спрегнута у звезду, са директно уземљеном неутралном тачком. Њене техничке карактеристике приказане су у Табели III. Магнетско коло је са ваздушним зазором и састоји се од пет стубова.

Табела III Техничке карактеристике компензационе пригушнице

Називни напон	420 kV
Називна фреквенција	50 Hz
Реактивна снага	250 Mvar
Називна струја	343,66 A
Спрега	Yn
Индуктивност намотаја	2,25 H (по фази)

Прекидач пригушнице моделован је као расклопни елемент са независно управљивим половима, техничких карактеристика датих у Табели IV.

Табела IV Техничке карактеристике прекидача

Време механичког укључења прекидача	50 ms
Време механичког искључења прекидача	30 ms

Мрежа је моделована као Thevenin-ов еквивалент који следи из снаге кратког споја на месту прикључења пригушнице. Амплитуда и пригушење ударних струја пригушнице доминантно зависе од параметара пригушнице и тренутка укључења прекидача, док

утицај удаљености и „јачине” мреже има секундарни ефекат и углавном утиче на амплитуду пренапона, а не на ефикасност контролисаног укључења. Уважавање отпорности у колу доводи до додатног пригушења транзијента и благог фазног помераја оптималне тачке укључења, али нема суштински утицај на стратегију контролисаног укључења нити значајно повећава грешку одређивања оптималног тренутка.

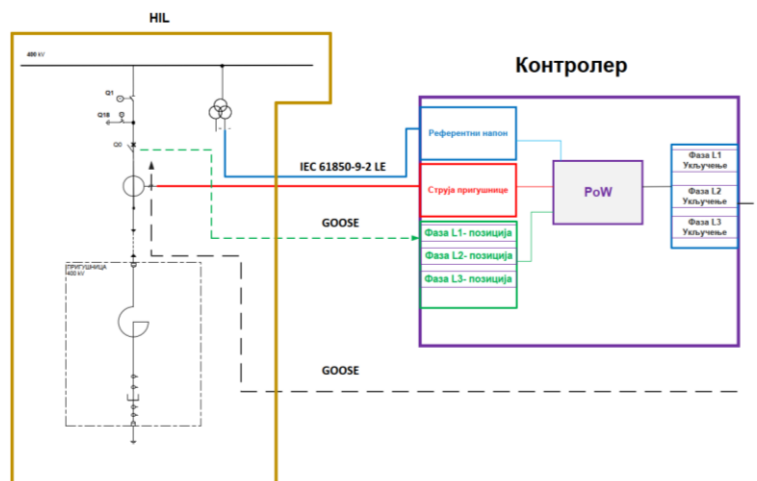
Модел примарне опреме на уређају HIL реализован је уз уважавање следећих ограничења:

- не постоје међусобне варијације у оперативним временима полова прекидача; она увек одговарају задатим вредностима у све три фазе;
- поставка уводи кашњење команде од тренутка издавања са контролера до њене регистрације од стране уређаја HIL; како се размена информација између контролера и уређаја HIL одвија порукама GOOSE, максимално кашњење је ограничено на 1 ms;
- нулта временска разлика између тренутка успостављања електричног и механичког контакта полова прекидача, што потврђује изостанак лука на осцилографским записима.

4.2 Контролер прекидача

Функција контролера имплементирана је у оквиру микропроцесорског уређаја за релејну заштиту и управљање (Слика 10). На основу анализе референтног напонског таласа, узимајући у обзир подешене параметре, као што су стратегија укључења и временске карактеристике прекидача, контролер рачуна и уводи оптималну временску задршку активирања калема за укључење прекидача.

Референтни сигнал се добија са напонског трансформатора прикљученог на сабирницама 400 kV. Њега генерише уређај HIL као *SV publisher*, а контролер преузима као *SV subscriber* у оквиру формиране *Process Bus* мреже. Тренутне вредности напона се шаљу у форми пакета одбирака дефинисаних као IEC 61850-9-2 *Sampled Values* стримови.



Слика 10. Логички дијаграм размене информација уређаја HIL и контролера

Садржај пакета приказан је у Табели V. У сваком пакету мерења, поред одбирака три фазна и нултог напона, налазе се и вредности фазних струја мерених на прикључцима компензационе пригушнице, као и рачунска вредност нулте струје.

Информације о положају расклопне опреме генерише уређај HIL као поруке GOOSE, док контролер шаље пакете GOOSE HIL-у са налогом за командовање појединачним половима прекидача.

Табела V Садржај пакета одбирака мерења

IEC 61850-9-2 Sampled Value стрим							
Напон сабирница				Струја пригушнице			
U _{L1}	U _{L2}	U _{L3}	3U ₀	I _{L1}	I _{L2}	I _{L3}	3I ₀
Поз 1	Поз 2	Поз 3	Поз 4	Поз 5	Поз 6	Поз 7	Поз 8

У контролеру су активиране функције надзора. Након сваког укључења контролер прикупља податке, анализира их и по потреби генерише аларм на уочену неисправност. Имплементиране су следеће функције:

- бележи вредност измерене ударне струје и пореди са подешеним лимитом, што на нашем примеру одговара вредности двоструке називне струје пригушнице;
- мери механичко време укључења прекидача на основу информације о сигналним контактима прекидача, моделованих на HIL уређају, и региструје његово одступање у односу на подешену вредност;
- мери електрично време укључења прекидача на основу детекције успостављања струје и региструје његово одступање у односу на рачунату вредност.

5. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА

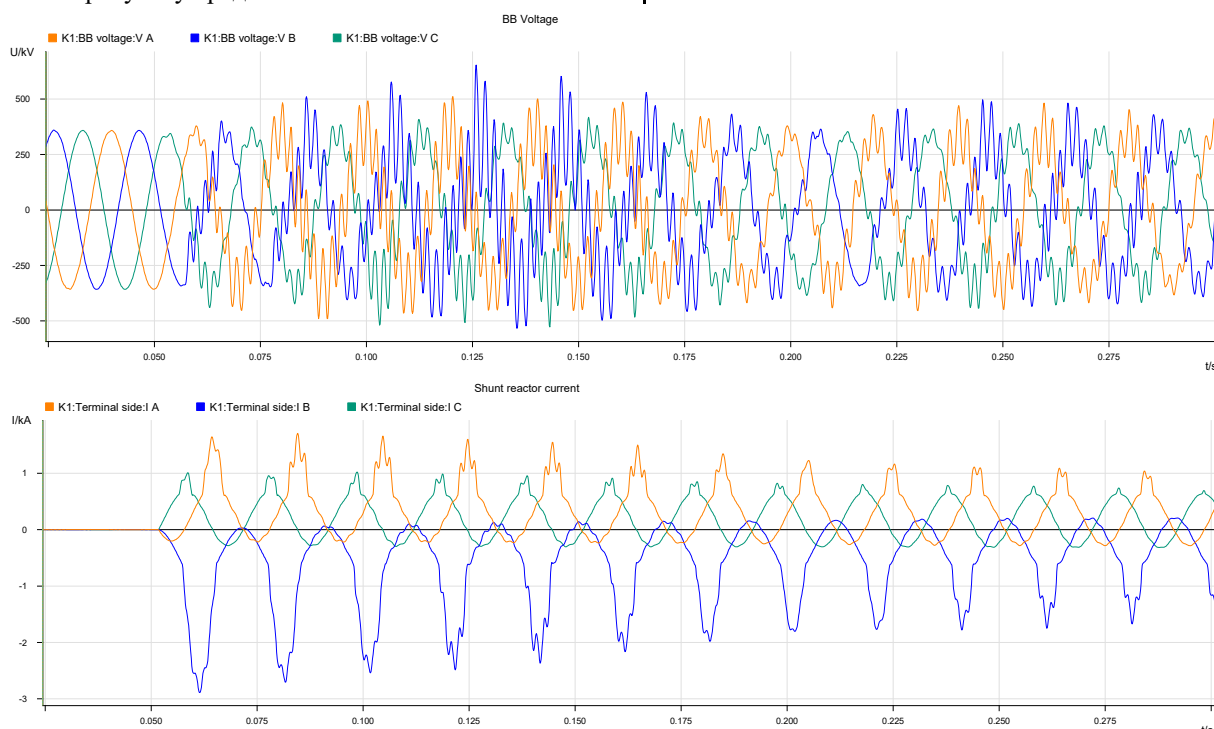
Како бисмо сагледали ефикасност примене описане технике, извршено је упоредно испитивање три различите стратегије укључења прекидача пригушнице на лабораторијском моделу, и то:

1. конвенционално – насумично истовремено укључење сва три пола прекидача;
2. контролисано укључење сваког пола прекидача у најнеповољнијем тренутку;
3. контролисано укључење сваког пола прекидача у оптималном тренутку.

Након сваког укључења, са контролера су преузети осцилографски записи и листе догађаја. На основу њих се могу очитати вредности и упоредити таласни облици напона и струја пригушнице, као и статуси помоћних контаката прекидача.

5.1 Конвенционално укључење прекидача

Конвенционално укључење карактерише истовремено генерисање команде укључења сва три пола прекидача. Контролер се у овом случају понаша као пасиван елемент који не уводи временску задршку на регистрован налог од система управљања. Како је тренутак издавања команде насумичан, степен несиметрије, као и амплитуда ударних струја пригушнице зависе од тренутка издавања налога, као и оперативног времена прекидача. Осцилографски запис (Слика 11) потврђује истовремено укључење сва три пола прекидача.



Слика 11. Таласни облици струје и напона при конвенционалном укључењу

На њему је уочљива зависност вредности ударне струје од тренутне вредности напона у тренутку укључења. Изражен је ударни период велике временске константе, тј. дужине трајања. Поменуто доводи до приметног изобличења таласних облика напона и струја, али и великих вредности ударних струја.

У овом случају вршне вредности су износиле $I_{L1} = 1,63 \text{ kA}$, $I_{L2} = 2,88 \text{ kA}$ и $I_{L3} = 955 \text{ A}$. Вредност ударне струје проводника неутралне тачке износи $I_N = 1,86 \text{ kA}$.

5.2 Контролисано укључење сваког пола прекидача у најнеповољнијем тренутку

Како је пригушница елемент индуктивне природе, контролисано укључење сваког пола прекидача у тренутку проласка напона кроз нулу у свакој од фаза представља најнеповољнији случај. Тада је изобличење таласних облика најизраженије.

Премда употреба контролера тежи да ограничи транзијент укључења, погрешним одабиром његових параметара може доћи до укључења при коме ће негативни ефекти бити најизраженији.

Таласни облици напона приказани су на Слици 15, а струја на Слици 16.

Овакво укључење праћено је изузетно високим вршним вредностима ударних струја $I_{L1} = 3,47 \text{ kA}$, $I_{L2} = 3,64 \text{ kA}$ и $I_{L3} = 3,80 \text{ kA}$. До изражаја долази несиметрија ударних струја, па вредност струје проводника за уземљење пригушнице достиже свој максимум од $I_N = 3,33 \text{ kA}$ (Слика 12).

С обзиром на дужину трајања ударног периода, у зависности од временског затезања земљоспојне заштите, може доћи до њене непотребне прораде.

Такође, због односа X/R параметара, једносмерна (DC) компонента струје споро опада, што повећава

вероватноћу да дође до засићења струјних трансформатора.

5.3 Оптимално укључење прекидача

Оптимална стратегија укључења пригушнице се заснива на укључењу сваког пола прекидача при максималној вредности напона. Референтни тренутак је пролазак таласног облика напона фазе L1 кроз нулу (*zero crossing*). Циљ контролера је да обезбеди укључење пола L1 са фазним померајем од 90° у односу на референтни тренутак, односно у моменту када вредност напона фазе A достигне свој максимум.

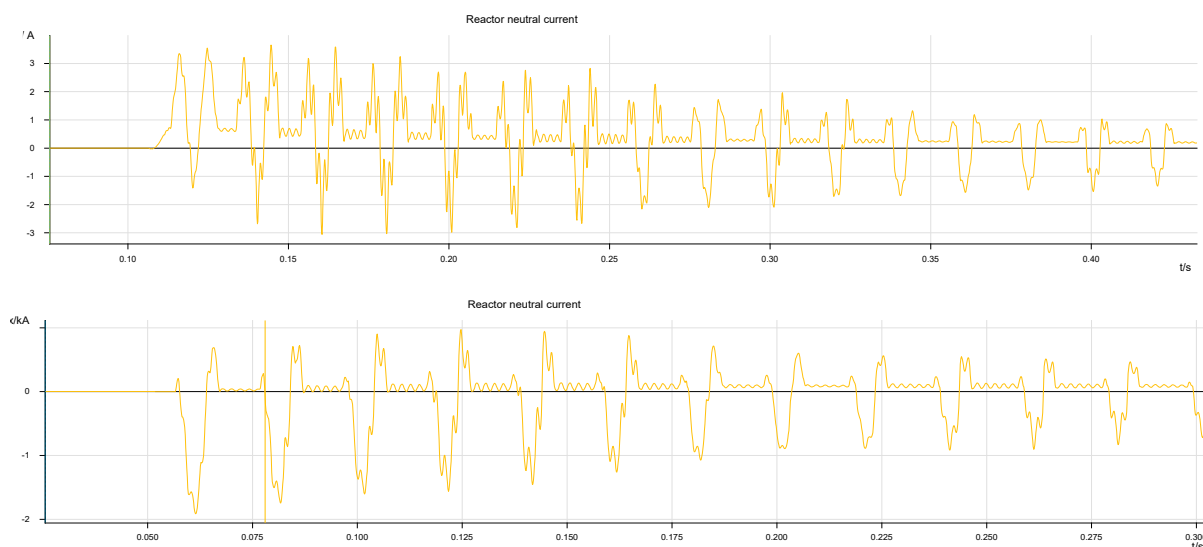
Свој максимум (са негативним предзнаком) следећа достиже фаза L3 за $90^\circ + 60^\circ = 150^\circ$, односно са кашњењем од $3,33 \text{ ms}$ у односу на фазу L1.

Последњи корак је укључење фазе L2, и то са теоријском задршком од $90^\circ + 120^\circ = 210^\circ$, односно $6,66 \text{ ms}$.

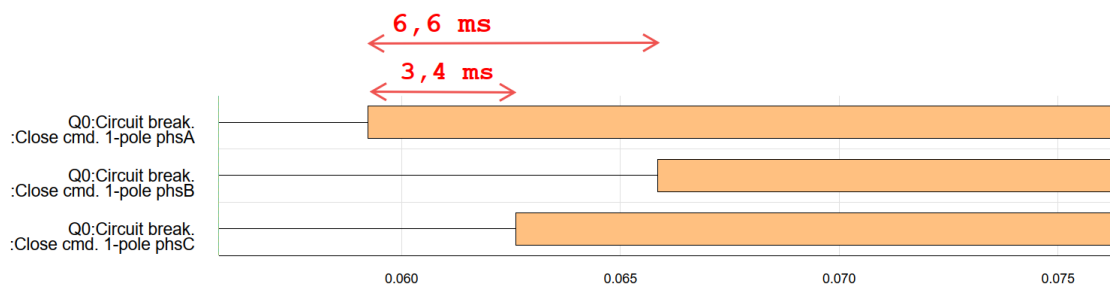
На Слици 13 приказано је секвенционално издавање команди укључења полова, док се анализом догађаја може утврдити да не постоје одступања оперативног времена контролера од теоријски идеалних вредности.

Анализом осцилографских записа уочено је правовремено укључење сваког пола. То потврђује пример фазе L1 (Слика 14), где се може видети успостављање струје при максималној вредности напона.

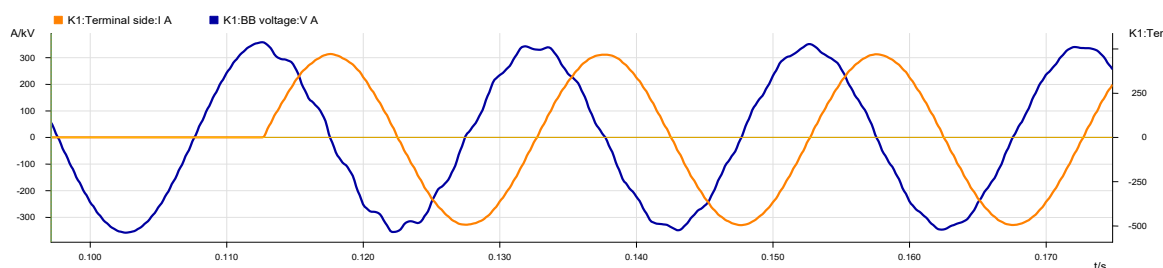
Поређењем таласних облика напона (Слика 15) и струје (Слика 16) може се закључити да се применом технике контролисаног укључења потпуно елиминише ударни период. Оптималним укључењем, изобличење таласног облика напона је готово не приметно, уз елиминацију виших хармоника.



Слика 12. Таласни облик нулте струје пригушнице најнеповољнијег (горе) и конвенционалног (доле) укључења пригушнице



Слика 13. Редослед издавања команди укључења полова прекидача



Слика 14. Тренутак успостављања струје у односу на таласни облик напона

Контролисаним укључењем прекидача пригушнице ограничавају се амплитуде ударних струја на $I_{L1} = 469 \text{ A}$, $I_{L2} = 523 \text{ A}$ и $I_{L3} = 488 \text{ A}$. Ефективна вредност (RMS) струје укључења у првој периоди износи приближно 340 A, што одговара називној струји пригушнице.

Контролисано укључење потврђује симетричне таласне облике струја и одсуство DC компоненте. Елиминацијом транзијентног периода ограничава се вредност ударне струје проводника за уземљење пригушнице на $I_N = 358 \text{ A}$ (Слика 17).

Са осцилографског записа се може приметити да је импулс транзијента нулте струје трајао приближно 6 ms у случају оптималног укључења, док је на

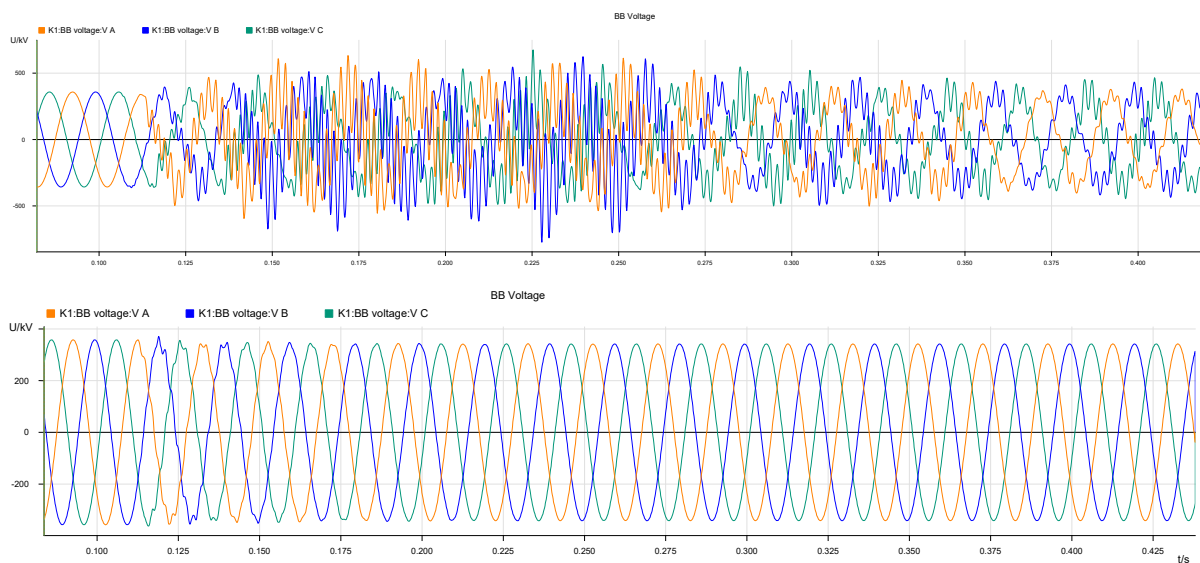
примеру најнеповољнијег трајао дужи од 500 ms. Тачно време није измерено јер је трајање записа ограничено.

Утицај примене контролисаног укључења на ограничавање вредности ударне струје пригушнице може се сагледати поређењем измерених вредности све три стратегије испитане на лабораторијском моделу (Табела VI).

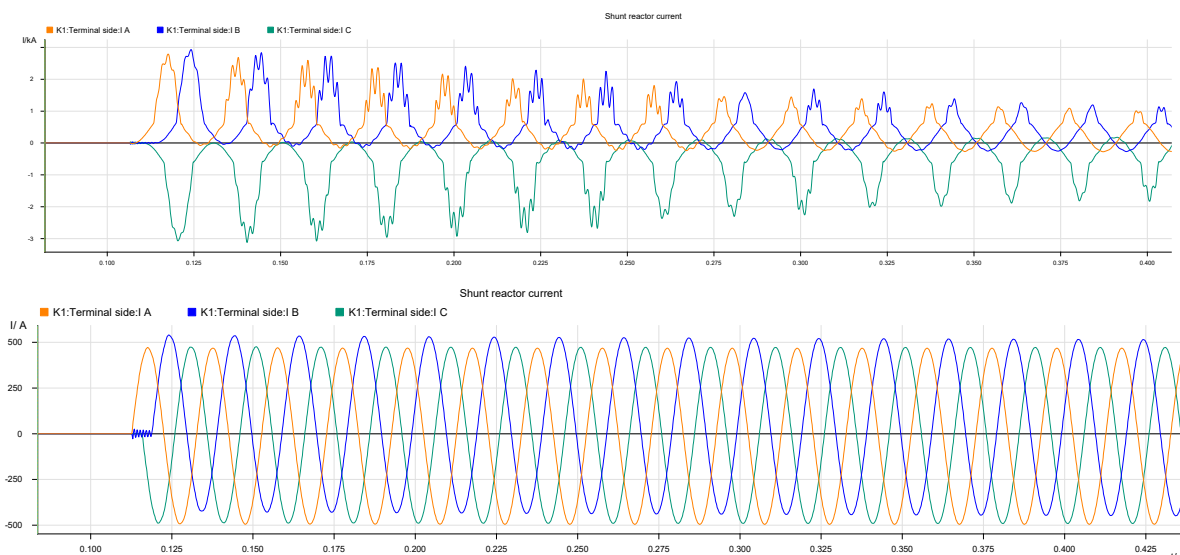
Максимална вредност ударне струје је 3,80 kA, док се контролисаним укључењем она ограничава на максимално измерена 0,52 kA. Такође, сузбијање несиметрије струја доводи до ограничавања вредности ударне струје проводника за уземљење пригушнице са $I_N = 3,33 \text{ kA}$ на $I_N = 0,36 \text{ kA}$.

Табела VI Вредности ударних струја пригушнице

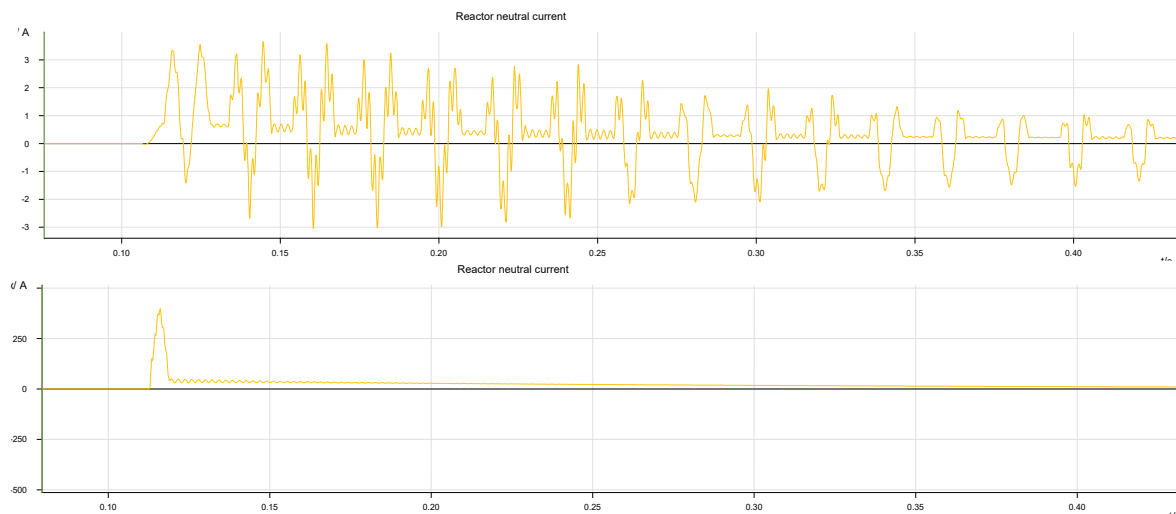
Ударна струја пригушнице	Фаза L1 [kA]	Фаза L2 [kA]	Фаза L3 [kA]	I_N [kA]
Конвенционално – неконтролисано укључење	1,63	2,88	0,95	1,86
Контролисано – најнеповољније укључење	3,47	3,64	3,80	3,33
Контролисано – оптимално укључење	0,47	0,52	0,42	0,36



Слика 15. Таласни облици напона најнеповољнијег (горе) и оптималног (доле) укључења пригушнице



Слика 16. Таласни облици струје најнеповољнијег (горе) и оптималног (доле) укључења пригушнице



Слика 17. Таласни облик нулте струје пригушнице најнеповољнијег (горе) и оптималног (доле) укључења

6. ЗАКЉУЧАК

Конвенционално (неконтролисано) укључење прекидача је насумичне природе, односно таласни облици зависе од вредности напона у тренутку укључења. Генерално посматрано, неконтролисано укључење доводи до значајног изобличења таласних облика напона праћеног дуготрајним прелазним процесом и високим вредностима ударних струја које достижу десетоструку вредност називне струје. Уочене су вредности струја проводника неутралне тачке од 1,86 kA које услед дугачког трајања ударног периода могу довести до непотребног реаговања релејне заштите.

Од великог значаја показала су се испитивања контролисаног укључења у најнеповољнијем тренутку. Тиме су добијени доследни резултати који пружају могућност анализе утицаја примене оптималног (*Point-on-Wave*) укључења. Резултати испитивања навели су ауторе да стекну увид у кључну улогу прецизне координације параметара контролера и времена прекидача. Свака разлика подешеног и стварног времена укључења прекидача од 1 ms рефлектује се као одступање од 18° у односу на оптимални тренутак укључења. Употреба контролера са погрешно подешеним параметрима резултује израженијим склопним транзијентом у односу на насумично укључење.

Анализом осцилографских записа три различите стратегије укључења прекидача пригушнице 400 kV, односно поређењем таласних облика и вредности ударних струја, потврђена је потпуна елиминација ударног периода применом технике контролисаног укључења. Са даљим развојем технологије долази до повећања флексибилности, поузданости и једноставности примене, уз истовремено смањење укупних трошкова имплементације, што омогућава њену ширу примену у оквиру електроенергетског система.

На крају треба истаћи да искључење прекидача пригушнице такође доноси изазове као што су „одсецање” индуктивне струје, ограничавање повратног напона и поновно паљења електричног лука. Управо ће ови проблеми бити предмет истраживања аутора у наредном периоду.

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је финансијски подржан од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије, бр. уговора: 451-03-137/2025-03/200103.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] European Network of Transmission System Operators for Electricity: „Controlled Switching Device: Application, Use And Maintenance Problems”, Final 16 November 2022.
- [2] Yahiou A., Mellaha H., Bayadib A., „Inrush Current Reduction by a Point-on-Wave Energization Strategy and Sequential Phase Shifting in Three-Phase Transformer”, *International Journal of Electrical Engineering*, Vol. 35 No. 12, p.p. 2321-2328, December 2022.
- [3] Dhotre D., Rajguru G., Belhekar V., Kulkarni P., „Reduction of Transient Inrush Current in Transformer Using Point-on-Wave Switching Method”, *International Journal of Scientific Development and Research*, Vol. 2 No. 5, p.p. 433 – 436, May 2017.
- [4] SIPROTEC 5 Point-On-Wave Switching Manual V9.90, document reference C53000-H5040-C082-7, edition 11. 2024.
- [5] Goldsworthy D., Roseburg T., „Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits”, *34th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October 2007.
- [6] Faiz M., Chang, A. Q., Mirjat, B. A., Memon N., „The Simulation Analysis of Shunt Reactor Controlled Switching at 500 kV Network”, *International Journal of Electrical Engineering & Emerging Technology*, Vol. 05, No. 02, p.p. 31-37, December 2022.
- [7] Kumar A., Perveen R., Parikh U., „Controlled Switching of Power Transformer and Shunt Reactors for Minimization of Switching Transients: A Review”, *Journal of The Institution of Engineers (India)*, Vol. 103, p.p. 1013–1024, October 2021.

БИОГРАФИЈЕ



Урош Његован је рођен у Панчеву 1990. године. У родном граду је завршио гимназију. Даље школовање наставља на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, где завршава основне и мастер академске студије. Године 2024. на истом факултету започиње

докторске студије на Одсеку за енергетику. Тренутно је запослен у компанији „Siemens Energy d. o. o. Beograd”. Области рада и интересовања су му релејна заштита и дигитализација електроенергетских постројења.

ORCID: 0009-0000-5626-0969



Зоран Стојановић је рођен у Пожаревцу 1979. године. Гимназију општег смера завршио је у Свилајнцу. Дипломирао је, магистрирао и докторирао на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2003, 2009. и 2012, респективно. У звање редовног професора на истом

факултету изабран је 2022, док као гостујући професор предаје на Електротехничком факултету Универзитета у Бањалуци, Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду и Електронском факултету Универзитета у Нишу. Области његовог стручног и научног интересовања су релејна заштита, разводна постројења, дигитална обрада сигнала, мониторинг и дијагностика високонапонске опреме.

ORCID: 0000-0003-2432-394X



Александар Марјановић је рођен у Београду 1991. године. Завршио је основну школу и гимназију у Ваљеву. Студије наставља на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, где завршава основне и мастер студије. На истом факултету 2024. године започиње докторске студије на

Одсеку за енергетику. Тренутно је запослен у компанији „Siemens d. o. o. Beograd”. Области рада и интересовања су му управљање електроенергетским системом и постројењима, дигитализација електроенергетских постројења, интеграција обновљивих извора и складишта електричне енергије, као и управљање микромрежама.

ORCID: 0009-0004-3318-8967

UDC: 621.311.1:621.318.43
621.316.542:621.3.015.3Uroš N. Njegovan^{1,2}, Zoran N. Stojanović¹, Aleksandar D. Marjanović^{1,3}

Mitigation of Switching Transients Using Point-on-Wave Controlled Circuit Breaker Closing

¹ University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade*² Siemens Energy d.o.o. Beograd – Belgrade, Serbia³ Siemens d.o.o. Beograd – Belgrade, Serbia

Original scientific research article

Highlights

- Effects of switching transients caused by the connection of different loads are presented
- The technique of controlled circuit breaker switching is described
- The effects of applying the technique were tested on a real-time simulator
- Compared controller and conventional shunt reactor circuit breaker switching

Abstract

Transmission lines loaded below their surge impedance present a significant source of reactive power in the network, that can lead to local voltage increase. Transmission system operators around the world turn to shunt reactors in combination with a conventional high-voltage circuit breakers to cope with voltage issues. Implementation of such solution introduces a significant increase in the number of switching transients. Using controlled switching technology (Point-on-Wave), through individual switching of each breaker pole at optimal time, it is possible to limit reactor inrush current when shunt reactor is energized and the recovery voltage when it is de-energized. The paper presents the negative effects of uncontrolled switching of shunt reactor on transmission system. The technique of controlling the timing of circuit breaker switching is presented as a tool to mitigate the negative effects of switching transients. The algorithm for controlled switching of the circuit breaker has been tested in the laboratory. The test setup consists of a Point-on-Wave Intelligent Electronic Device (IED) and HIL (Hardware-in-the-Loop) device used to simulate 400 kV shunt reactor and circuit breaker. The devices exchange information using IEC 61850 Sampled Values and GOOSE protocol. Experimental results confirm limitation of inrush current magnitude when shunt reactor is energized by controlled switching device.

Keywords

Controlled switching, Hardware-in-the-Loop, Point-on-Wave, Reactor inrush, Shunt reactor

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Application of Controlled (Point on Wave) Switching for 400 kV Shunt Reactor" (<https://doi.org/10.2478/epic.2025.00008>), awarded by Expert Committee EC-B5 Protection and Automation at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, May 26-30, 2025

Received: December 26th, 2025Reviewed: March 19th, 2026Modified: May 6th, 2026Accepted: May 12th, 2026

*Corresponding author: Uroš N. Njegovan, +381 60/81-70-242

E - mail: uros.njegovan@siemens-energy.com

УДК: 621.311.1(497.11)
621.311:351.824.11(497.11:4-6EU)

Марија Ђорђевић¹, Срђан Младеновић¹, Ивана Стаменић¹, Бранко Шумоња¹



Имплементација европских процеса у оперативни рад ЕМС АД

¹ Акционарско друштво Електромрежа Србије, Београд, Србија*

<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.6>

Стручни рад

Кључне поруке

- Овај рад разматра координисане процесе који се одвијају на нивоу европских оператора преносних система и главне промене које се спроводе у оперативном раду ЕМС АД
- Описана су два најбитнија процеса и то координисана сигурност и координисани прорачуни преносних капацитета
- Дате су техничке основе за дефинисање региона за координисани прорачун капацитета у региону Југоисточне Европе
- Сагледане су могућности српског оператора преносног система да испуни регулаторну обавезу доделе преносног капацитета према MACZT методологији

Кратак садржај

На нивоу ENTSO-E и Европе одвијају се процеси који директно утичу на електроенергетски сектор Србије и свакодневни рад Оператора преносног система. Два кључна процеса у оквиру ENTSO-E – координисана анализа сигурности и координисани прорачуни преносних капацитета – спроводе се на усклађен начин. У оквиру прорачуна преносних капацитета примењују се два методолошка приступа: NTC и flow-based метод. Овај рад приказује регулаторни процес прикључења ЕМС АД европским регионима за прорачун капацитета – CORE и SEE региону – уз посебан осврт на изазове са којима се ЕМС АД суочава у овом контексту. Такође, представљени су основни концепти координисаних процеса, који ће се делом реализовати унутар Оператора преносног система, а делом кроз регионалне координационе центре. Без обзира на примењену методологију прорачуна преносних капацитета у различитим фазама, неопходно је испунити правило доделе 70% капацитета критичног елемента. У раду су приказани прелиминарни резултати испуњења овог правила, узимајући у обзир да је његова примена обавезна у складу са Законом о енергетици.

Кључне речи

ENTSO-E, MACZT (*Margin Available for Cross-Zonal Trade*), RCC (*Regional Coordination Centre*), TSO (ОПС)

Примљено: 19. новембра 2025. Рецензирано: 11. марта 2026.
Измењено: - / без примедби / Одобрено: 12. марта 2026.
* Кореспондирајући аутор: Марија Ђорђевић, +381 64/840-86-69
Имејл: marija.djordjevic@ems.rs

Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију рада „Координисани процеси у ЕМС АД у складу са најновијом европском регулативом” (<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.6>), награђеног у Студијском комитету СТК-Ц5 *Тржиште електричне енергије и регулација*, на 37. Саветовању CIGRE Србија, 26-30. маја 2025.

1. УВОД – РЕГУЛАТОРНИ ОКВИР

Нови законски оквир, којим је транспонована европска регулатива, донео је нову реалност у оперативном планирању и управљању преносним системом. Према одлуци Министарског савета Енергетске заједнице (*Energy Community*, EnC), донетој 15. децембра 2022. године о транспоновану европске регулативе у вези са електроенергетиком у законодавне оквире свих чланица Енергетске заједнице, земље EnC-а обавезале су се да до краја 2023. године спроведу транспозицију у национално законодавство. У питању су уредбе CEE (*Clean Energy Package*): 2019/942, 2019/943, 2019/941, као и пет мрежних кодова (SOGL, ER, CACM, FCA и GLEB), што представља значајан корак у правцу укључивања Републике Србије у јединствено европско тржиште електричне енергије. На овај начин мрежни европски кодови су постали обавеза, у односу на рану имплементацију мрежних кодова која је имала и неку меру произвољности.

Једна од кључних обавеза уговорних страна Енергетске заједнице у оквиру транспозиције европске регулативе јесте дефинисање региона за спровођење координисаних активности, као што су безбедносне анализе и прорачуни капацитета. Основне одредбе које се односе на свакодневни рад оператора преносног система су утврђивање региона за оперативну сигурност, као и региона за прорачуне преносних капацитета.

Друга битна одредница у координисаним прорачунима преносних капацитета повезана је са испуњењем критеријума доделе 70% преносног капацитета или MACZT критеријума, што за последицу може да има то да се проблеми са сигурношћу решавају на краћим временским хоризонтима, као што је интрадневни и временски хоризонт близу реалном времену. Такође, за очекивање је и то да ће се отклањање проблема са загушењима решавати редиспечингом и контратрговином (*counter-trading*), што за последицу може имати значајне оперативне и финансијске импликације.

2. КООРДИНИСАНИ РЕГИОНАЛНИ ПРОЦЕСИ

Овај рад се неће бавити политичким конотацијама дефинисања региона, већ само техничким параметрима. Дефинисање региона за оперативну сигурност (*Security Operational Region*, SOR) постоји већ више деценија на нивоу Југоисточне Европе и првенствено као одговор на потребу за координисаним планирањем искључења на годишњем, месечном и седмичном хоризонту. Ова пракса је проистекла из нужности међусобног усаглашавања активности међу операторима преносних система, посебно када је реч о кључним 400 kV, 220 kV и интерконективним далеководима.

Касније се овај приступ институционализовао кроз формирање регионалних координационих центара (RCC), који су проширили оквир координације и на друге планерске активности, као што су:

1. моделовање система у различитим временским хоризонтима: интрадневном, дневном нивоу, као и на нивоу за два дана унапред, седмичном, месечном, па до годишњег нивоа; ове активности се односе на израду појединачних модела, као и заједничког модела интерконекције, као предуслова за све планерске активности;
2. координисање оперативне сигурности и провере испуњености сигурносних критеријума *N-1* и *N-x*, где доминантну улогу преузимају координациони центри за сигурност;
3. координисање регионалне/ENTSO-E краткорочне адекватности (*Short-term Adequacy*, STA);
4. координација оперативног планирања искључења свих релевантних елемената на ENTSO-E нивоу (*Operational planning coordination*, OPC).

ЕМС АД учествује у изради заједничког мрежног модела (*Common Grid Model*, CGM), који је основа за све прорачуне који се односе на сигурност преносног система и на прорачуне преносних капацитета. Креирање заједничког паневропског модела одвија се на ротационом принципу свих европских регионалних координационих центара, а јединствен заједнички модел користи се у целој Европи и у нашем региону. Овако генерисан заједнички модел користи се у анализама на нивоу читаве ENTSO-E мреже, укључујући и регион у којем ЕМС АД делује, чиме се обезбеђује координисано планирање и оперативна сигурност система.

Када је у питању регионална координација сигурности, у региону Југоисточне Европе, који обухвата и земље чланице Европске уније (ЕУ) и земље које нису у ЕУ, примењују се европски приступ и динамички распоред активности са циљем да се још у фази планирања за дан унапред идентификују потенцијална критична стања и благовремено предузму корективне мере.

Земље у европским регионима за сигурност имплементирале су веома сложен процес координисане сигурности који се одвија у тачно дефинисаним временским интервалима. Оператори преносних система треба да доставе своје мрежне моделе (IGM) за наредни дан до 18 часова, креирање заједничког мрежног модела (CGM) завршава се у наредних сат времена, а на њему се спроводи регионална оперативна анализа сигурности (*Cross-Regional Operational Security Assessments*, CROSA).

Уколико се установи да постоје преоптерећења, потребно је применити корективне мере и креирати нове моделе мреже, а потом спровести нову координисану оперативну анализу сигурности – тзв.

CCROSA (*Coordinated Cross-Regional Operational Security Assessments*).

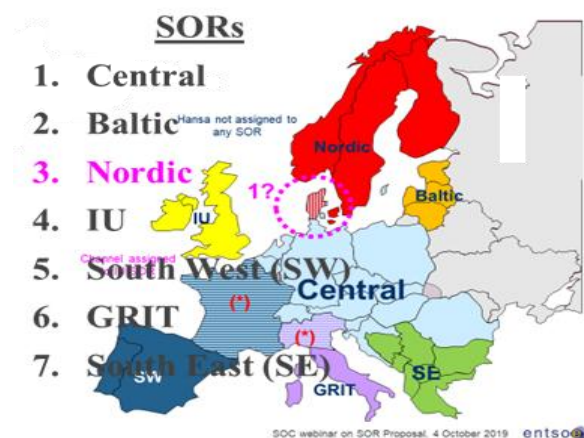
Овакав режим рада захтева да се оперативне активности планирања одвијају и током поподневне смене, често до 22 часа, а свака фаза процеса праћена је телеконференцијама на којима активно учествују како оператори преносних система (ОПС, тј. *Transmission System Operator*, TSO) тако и регионални координациони центри (RCC).

У нашем региону, у сарадњи са SCC-ом, Регионалним координационим центром за сигурност, спроводе се најбитније активности које представљају увод у комплетну примену CROSA процеса, како је то надаље описано.

Израда модела у D-1, која се спроводи до 18 часова, затим спајање заједничког модела и израда анализа сигурности.

Свакодневно се организују координационе телеконференције на дневном нивоу, у термину између 20 часова и 22 часа, на основу спроведених сигурносних анализа ради разматрања и, по потреби, примене корективних мера (ремидијалних акција). Ове акције могу имати нулту финансијску последицу, али могу укључивати и мере које повлаче оперативне финансијске трошкове.

Предуслов за потпуно успостављање CROSA процеса јесте дефинисање региона за оперативну сигурност, SOR-а. На ENTSO-E нивоу дефинисани су оквири SOR-ова (Слика 1), на којима се обављају све функционалности, дефинисане регулативом, на координисан начин у сарадњи са другим ОПС-ом и регионалним координационим центрима: Central, Baltic, Nordic, IU, South West (SW), GRIT и South East (SE).

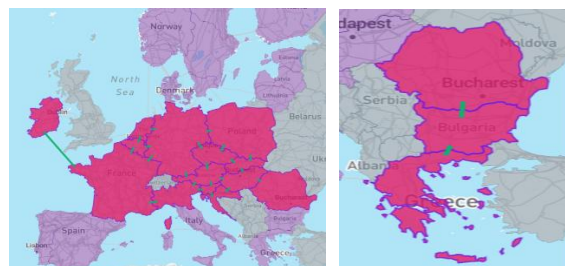


Слика 1. Иницијална дефиниција региона за оперативну сигурност

У току је транспозиција регулативе Европске уније, па када је у питању регион земаља Енергетске заједнице, SOR је у процесу редефинисања. Очекује се да ће будућа дефиниција SOR-а бити у корелацији са дефиницијом региона за прорачун преносних капацитета.

3. РЕГИОНИ ЗА ПРОРАЧУН ПРЕНОСНИХ КАПАЦИТЕТА

У Европи су већ дефинисани Региони за координирани прорачун преносних капацитета, такозвани CCR-ови, који имају развијене своје методологије прилагођене специфичностима региона. Тренутно су дефинисани следећи CCR-ови: Балтички, Централна Европа, Core регион, регион Грчка–Италија, Hansa регион, Северна Италија, Нордијски регион, SEE регион (Југоисточна Европа), SWE регион (Југозападна Европа).



Слика 2. Приказ CCR региона Централне и Југоисточне Европе

У земљама Енергетске заједнице у току је транспозиција, где се на нивоу земаља Енергетске заједнице дефинишу региони за прорачун преносних капацитета. Као алтернатива такозваном *default* решењу, које је иницијално предложено на Министарском савету, због нетипичности појединих земаља Енергетске заједнице у току је спровођење алтернативног решења које подразумева да се зоне трговања припоје двама постојећим европским регионима или CCR-у. На Сlici 2 дат је приказ региона Централне Европе и региона Југоисточне Европе, којима би се у некој скоријој перспективи прикључила Србија. Овим би се ЕМС АД, српски оператор преносног система, CGES, црногорски оператор преносног система, и NOSBiH, оператор за БиХ, прикључили европском Core/Core региону, а остали оператори преносних система у ЕнС земљама би се прикључили SEE европском региону.



Слика 3. Дефинисање региона за прорачун преносних капацитета

Решење је имплементирано. Постоји више техничких показатеља који потврђују оправданост овакве поделе, а неки од кључних су следећи:

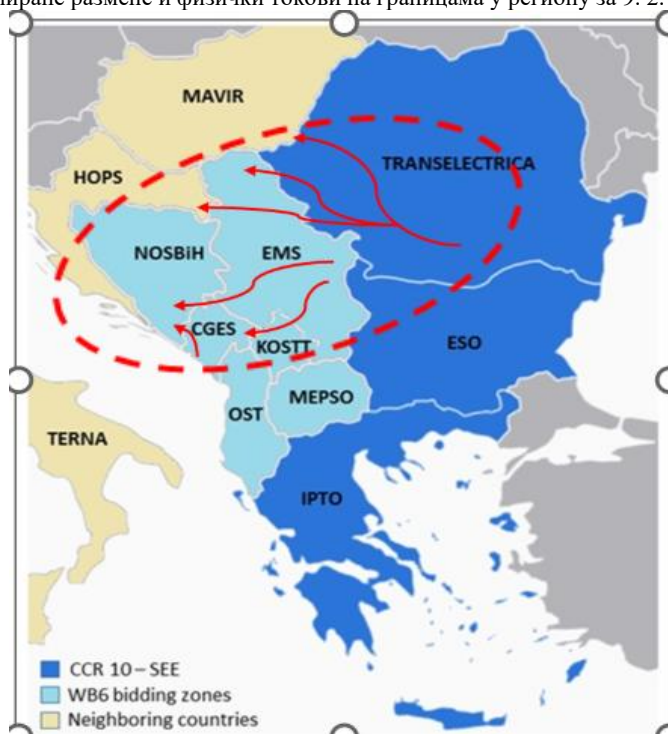
- анализом неколико недавних, највећих поремећаја који су се десили у последњих двадесетак година, и који су се осетили на читавој синхроној области, дошло је до раздвајања система у Хрватској, Мађарској, Србији и Румунији; показало се да постоје слабе тачке које се морају координисано разматрати;
- важно је успоставити координирани прорачун преносних капацитета заснован на токовима снаге или коришћењем координисаног NTC-a (нето преносни капацитет) као прелазног решења; овим би се избегли неконтролисани

токови (кружни токови) који су основни извор несигурности у преносној мрежи;

- ефекат достизања 70% капацитета, јер се узимају утицаји токова који нису контролисани и потичу из других зона; тренутно се у ЕМС АД види велики утицај планираних токова (комерцијалних) на граници Мађарска–Румунија, а физички токови се затварају преко преносне мреже Србије; приказ токова је дат на Слици 4 за један нетипичан дан у коме је постојао велики транзит са југа ка северу, због огромне производње из соларних извора електричне енергије у Грчкој.



Слика 4. Планиране размене и физички токови на границама у региону за 9. 2. 2025. у 11.30 ч.



Слика 5. Утицај прекограничних размена између Core региона и балканских земаља

Огромни утицаји токова из региона ЈИЕ на токове у CORE региону. Тако, на пример, далеководи ДВ 400 kV „Угљевик–Митровица” према PTDF факторима (*Power Transfer Distribution Factor*) имају утицај и до 13%, као и ДВ 400 kV „Требиње–Ластва” према PTDF факторима има утицај и до 13% на CORE регион. Из тога се може закључити да је велики утицај између CCR-ова који се мора узети у обзир како би се на што тачнији начин прорачунали преносни расположиви капацитети.

Ово су разлози због којих се тренутно реконфигурише предефинисани регион *Shodow SEE* CCR, где би се креирало алтернативно решење у коме су ЕМС АД, CGES и NOSBiH прикључени CE/CORE региону. На овај начин би се дневни прорачуни капацитета спроводили по методи заснованој на токовима снаге, где се сагледава појединачно сваки елемент мреже у најкритичнијим испадима. Као технички оптимално и регулаторно ефикасно решење, прорачуни расположивих преносних капацитета би се најпрецизније реализовали уколико би цела континентална Европа била дефинисана као јединствени регион за прорачун капацитета заснован на токовима снаге (*flow-based CCR*).

4. МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРИМЕНУ MACZT-а КАО ИНДИКАТОРА ДОСТУПНОСТИ ПРЕКОГРАНИЧНИХ КАПАЦИТЕТА

ACER (Асоцијација европских регулаторних тела) израдио је Препоруку за одређивање минималног расположивог капацитета између зона трговања (*Margin Available for Cross-Zonal Trade – MACZT*), која представља основу за прорачун расположивих капацитета на зонама трговања и обезбеђује уједначен и транспарентан приступ у свим земљама региона: „*Recommendation No 01/2019 of the European UNION Agency for the Cooperation of Energy Regulators of 08 August 2019 on the Implementation of the Minimum Margin Available for Cross-zonal Trade Pursuant to Article 16(8) of Regulation (EU) 2019/943*”.

Маргина расположива за прекограничну трговину (MACZT) користи се као технички индикатор доступности преносне мреже за прекограничну размену електричне енергије. Применом MACZT-а омогућава се повезивање физичких ограничења преносног система са резултатима прекограничних токова, са циљем идентификације структурних и оперативних фактора који утичу на ниво расположивих капацитета.

MACZT се одређује и прати за лимитирајући критични мрежни елемент са загушењем (*Critical Network Element with Contingency*, CNEC). За сваки посматрани временски оквир и критични мрежни елемент, MACZT представља меру физичког капацитета преносне мреже који је стављен на располагање прекограничној трговини.

MACZT се дефинише као збир маргине добијене кроз координисан прорачун прекограничних капацитета и утицаја протока који нису обухваћени координисаним прорачуном капацитета:

$$MACZT_i = MCCC_i + MNCC_i, \quad (1)$$

где индекс i означава лимитирајући критични мрежни елемент са загушењем.

Маргина из координисаног прорачуна капацитета (*Margin from Coordinated Capacity Calculation*, MCCC) представља део маргине расположиве за прекограничну трговину који произилази из координисаног прорачуна прекограничних капацитета, унутар дефинисане координационе области.

MCCC одражава утицај прекограничних размена на критичне мрежне елементе који се планирају и рачунају заједнички од стране више оператора преносних система, у складу са договореним методологијама и унутар исте координационе области.

У случају примене координисаног NTC приступа, MCCC се израчунава као збир производа позитивних PTDF вредности критичног мрежног елемента и нето преносних капацитета по појединачним оријентисаним прекограничним правцима:

$$MCCC_i = \sum_b pPTDF_{i,b} \cdot NTC_b, \quad (2)$$

где:

1. $pPTDF_{i,b}$ представља позитивну вредност PTDF фактора критичног мрежног елемента i у смеру одговарајућег оријентисаног прекограничног правца b ;
2. NTC_b представља нето преносни капацитет одређен у поступку прорачуна капацитета за прекогранични правац b за разматрани временски оквир.

Формулом (2) сумарно се обухватају сви прекогранични правци који припадају посматраној координационој области.

На овај начин, MCCC представља део расположиве маргине који је под директном контролом координисаног планирања капацитета и који у највећој мери одражава ефикасност процеса прорачуна прекограничних капацитета унутар координационе области (CCR).

Маргина из некоординисаних утицаја (*Margin from Non-Coordinated Capacity Calculation*, MNCC) представља део маргине који одражава утицај токова који нису обухваћени координисаним прорачуном капацитета, односно токова који потичу од размена ван координационе области (CCR).

Ова компонента обухвата утицај:

- токова који нису предмет заједничког регионалног прорачуна;
- нето позиција зона трговања које нису укључене у координисан прорачун капацитета.

MNCC се одређује на основу релевантних PTDF вредности и одговарајућих нето размена/позиција које изазивају физичке токове на мрежи, а које оператори преносних система не могу директно оптимизовати у оквиру координисаног прорачуна преносних капацитета.

MNCC је често негативна компонента, јер некоординисани токови могу додатно оптеретити

критичне мрежне елементе и смањити маргину расположиву за прекограничну трговину.

Примена MACZT методологије омогућава квантификацију укупне маргине расположиве за прекограничну трговину и раздвајање њених компоненти на координисану (MCCC) и некоординисану (MNCC). Анализа ових компоненти указује на то да ограничења доступности прекограничних капацитета не произилазе искључиво из процеса прорачуна капацитета, већ су у великој мери условљена физичким ограничењима преносне мреже.

Део који се односи на физичка загушења мреже биће детаљно описан у Поглављу 6 овог рада, које се односи на обавезу ОПС-а да изради документ који се зове Акциони план.

5. ПРЕЛИМИНАРНО САГЛЕДАВАЊЕ ИСПУЊАВАЊА КРИТЕРИЈУМА MACZT (70% ДОДЕЉЕНОГ КАПАЦИТЕТА)

ЕМС АД већ више од деценије на нивоу Југоисточне Европе са ОПС-овима из региона спроводи елементе координисаних прорачуна расположивих преносних капацитета. Основне заједничке активности обухватају хармонизацију тотала, размену месечних појединачних модела, спајање јединственог заједничког модела на коме се спроводе прорачуни по принципу нето преносног капацитета, односно NTC методологије. Координација се одвија на бази договора ОПС-ова према годишњем календару.

Увођењем Регионалних координационих центара (RCC), процеси прорачуна су подигнути на значајно виши ниво, посебно у погледу временских хоризоната и методолошке тачности. Наш регионални RCC–SCC спроводи седмичне прорачуне NTC вредности за све зоне трговања оператора који користе његове услуге.

Увођењем мрежног кода *Guideline on Capacity Allocation and Congestion Management* (CACM), који је у наше законодавство транспонован преко Уредбе о успостављању смерница за расподелу капацитета и управљање загушењима, прорачуни на дневном и интрадневном нивоу морају се спроводити у оквиру RCC-а и то према методологији заснованој на токовима снаге. У одређеним случајевима, дозвољена је и привремена примена NTC методологије, под условом да оператори докажу да *flow-based* приступ не би био ефикаснији, уз претпоставку идентичног нивоа сигурности система.

У оба методолошка приступа прорачуна преносних капацитета потребно је испунити правило 70% додељеног капацитета или такозвано MACZT правило.

Нови Закон о енергетици (ЗОЕ) прецизирао је обавезу испуњења критеријума за оба методолошка приступа:

1. за границе између зона трговања на којима се примењује методологија прорачуна капацитета заснована на хармонизованом нето преносном капацитету (NTC), оператори преносног система

дужни су да обезбеде минимално 70% капацитета идентификованог критичног елемента за прекограничну трговину, под условом да су испуњени критеријуми сигурности за дефинисану листу испада;

2. за границе између зона трговања за које се примењује прорачун капацитета заснован на токовима снаге минимални капацитет је маргина доступна за токове услед размене између зона трговања на сваком критичном елементу мреже, који треба да износи 70% капацитета уз испуњење критеријума сигурности за одређену листу испада, док преостали износ од 30% капацитета може да се користи за маргину поузданости, кружне токове и унутрашње токове.

Обавезу испуњења критеријума 70% доделе капацитета ЕМС АД студиозно је сагледавао и пре ступања на снагу новог ЗОЕ и благовремено набавио TNA алат са датим перформансама. Прелиминарне анализе које је ЕМС АД спровео за 2024. и делимично за 2025. годину показују да се степен испуњења MACZT критеријума (70% додељеног капацитета за прекограничну трговину) креће у распону од 30% до 70% MACZT-а, али у односу на капацитет који је ЕМС АД прорачунао.

Међутим, хармонизована (финална) NTC вредност зависи и од прорачуна суседног оператора преносног система, с обзиром на то да се на свакој граници усваја нижа вредност од две предложене вредности. Такође, ЕМС АД на транспарентан начин више година уназад контролише KPI – индикаторе квалитета, где се заправо дешава да је на билатералном усаглашавању преносних капацитета, у већини случајева, суседни ОПС био узрок мање финалне хармонизоване вредности, које су дате касније на алокацију.

Међутим, све земље – и ЕУ чланице и оне које то нису – имају обавезу испуњења прописаног правила, тако да ће се сви ОПС-ови трудити да достигну захтеваних 70% додељеног капацитета.

У Табели I дата је процена испуњености критеријума MACZT уколико би се анализирали просечни додељени капацитети у последње три године на појединим границама. Узет је принцип да се усваја већа вредност од средње вредности по смеру или вредност из 2024. године. Проценат испуњености је дат у Табели I у односу на зимске лимите и креће се од 28% до 49%.

У раду су презентовани и резултати уколико би се прорачуни MACZT критеријума радили по дефинисаној ENTSO-E методологији, а не према просечним додељеним вредностима преносних капацитета. Најпре је приказан принцип сагледавања MACZT критеријума, а потом сумарна сагледавања испуњености за неколико месеци у 2025. и 2024. години.

У Табели II анализиран је април 2025. и дат је пример када је критеријум MACZT испуњен, чак 75% на критичном елементу ДВ 400 kV „Порциле де Фиер (Port'île de Fier) – Ђердап”, за случај испада неколико критичних ДВ 400 kV: „Бор 2 – Ђердап”, „Бор 2 –

Ниш 2", „Панчево 2 – ПРП Чибук” и „Дрмно – ПРП Чибук”.

Табела I Проценат испуњености MACZT критеријума, уколико се узимају просечне алоциране NTC вредности

	Usaglašen NTC	Maximalni kapacitet	% trenutne vrednosti	MACZT 70%
RS-HU	644	1329	49	70
RS-RO	543	1770	31	70
RS-BG	392	1511	26	70
RS-MK	583	1329	44	70
RS-ME	306	868	35	70
RS-BA	539	1931	28	70
RS-HR	500	1502	33	70

Табела II Приказ MACZT-а за прорачун NTC од Бугарске и Румуније према Србији

Critical outage	Critical branch	MACZT [%]
DV 400 kV Bor 2 - Đerdap	DV 400 kV Portile de Fier - Đerdap	74
DV 400 kV Bor 2 - Niš 2		83
DV 400 kV Pančevo 2 - PRP Čibuk		75
DV 400 kV RP Drmno - PRP Čibuk		74

ЕМС-ов предлог за композитни NTC на граници RS > BG + RO био је 1900 MW, док је NTC циљ за достизање 70% капацитета износио од 1596 MW до 1801 MW.

Уколико се посматра други смер, од BG + RO → RS, уочава се да је достигнути MACZT 69%, када је ЕМС АД предложио композитни NTC од 1900 MW. Да би се иначе достигао критеријум 70% MACZT-а, понуђени NTC би требало да буде 1928 MW. Резултати су приказани у Табели III.

Табела III Приказ MACZT-а за прорачун NTC од Бугарске и Румуније према Србији

Critical outage	Critical branch	MACZT [%]
TR 1 400/110 Bor 2	TR 2 400/110 Bor 2	69
TR 2 400/110 Bor 2	TR 1 400/110 Bor 2	69

Пример из јуна 2024. анализиран је на граници RS → HR, BA, где је испуњеност критеријума 57%, при чему је ЕМС-ов предлог за композитни NTC био 1200 MW. Већ на NTC вредности од 843 MW долази до преоптерећења критичне гране ДВ 220 kV „Обреновац – Ваљево 3”, при испаду ДВ 400 kV „РП Младост – С. Митровица”. За достизање 70% критеријума MACZT требало би алоцирати чак 1524 MW, при чему би критични елемент био веома оптерећен. Резултати су приказани у Табели IV.

У супротном смеру HR, BA → RS, при испаду ДВ „Требиње–Ластва” преоптерећује се ДВ 220 kV „Вишеград–Пожега”, а предложени NTC је 900 MW, при чему је испуњеност критеријума 61%. Резултати су приказани у Табели V.

Табела IV Приказ MACZT-а за прорачун NTC од Србије према Хрватској и Босни и Херцеговини

Critical outage	Critical branch	MACZT [%]
DV 400 kV RP Mladost - S.Mitrovica	DV 220 kV Obrenovac - Valjevo 3	57

Табела V Приказ MACZT-а за прорачун NTC од Хрватске и Босне и Херцеговине према Србији

Critical outage	Critical branch	MACZT [%]
DV 400 kV Trebinje - Lastva	DV 220 kV Višegrad - Požega	61

Видимо да је за достизање датог услова од 70% преносна мрежа често преоптерећена, и у том случају би се проблем решавао у реалном времену редиспечингом, који има финансијске последице.

У раду је такође презентован прорачун MACZT критеријума који разматра критичне елементе у мрежи за неколико карактеристичних месеци из 2024. и 2025. године. Напомена је да су процене рађене према ЕМС-овим предлозима добијеним из прорачуна у складу са ENTSO-E методологијом. Вредности које су биле алоциране углавном су смањене због суседних ОПС-ова у процесу хармонизације, где је принцип да се усвоји минимална предложена вредност два суседна OPS-a.

Сумарни резултати су приказани у табелама VI–IX.

Табела VI Анализа испуњености MACZT-а за јул 2024.

	Na kritičnom koraku		NTC target [MW]	EMS predlog	
	NTC calculated [MW]	MACZT[%]		NTC [MW]	MACZT [%]
Jul 2024.					
RS -> HU	1137	68	1278	800	55
HU -> RS	762	52	1115.2	800	54
RS -> BG + RO	2282	114	1104	1100	70
BG + RO -> RS	1245	45	1832	1400	56
RS -> BA + HR	1345	74	1256	900	49
BA + HR -> RS	454	53	610	900	73
RS -> ME + MK	1808	61	1984	1300	51
ME + MK -> RS	624	35	1358	1300	68

Табела VII Анализа испуњености MACZT-а за април 2025.

	Na kritičnom koraku		NTC target [MW]	EMS predlog	
	NTC calculated [MW]	MACZT[%]		NTC [MW]	MACZT [%]
April 2025.					
RS -> HU	682	14.7	2642	1000	24
HU -> RS	/	/	/	/	/
RS -> BG + RO	1723	64.6	1596	1900	83
BG + RO -> RS	1432	52	1928	1900	69
RS -> BA + HR	945	21	2600	1200	36
BA + HR -> RS	1044	50	1250	1200	67
RS -> ME + MK	1723	57.7	1794	1300	52
ME + MK -> RS	1263	63.7	1390	900	65

Табела VIII Анализа испуњености MACZT-а за јун 2024.

Jun 2024.	Na kritičnom koraku		NTC target [MW]	EMS predlog	
	NTC calculated [MW]	MACZT[%]		NTC [MW]	MACZT [%]
RS -> HU	997	58	1156	900	55
HU -> RS	1742	81	1563	1000	53
RS -> BG + RO	1469	53	2145	800	29
BG + RO -> RS	1456	55	1930	800	42
RS -> BA + HR	843	33	1524	1200	57
BA + HR -> RS	1056	65	1634	900	61
RS -> ME + MK	1374	57	1473	1300	55
ME + MK -> RS	1526	76	1377	1400	68

Табела IX Анализа испуњености MACZT-а за август 2024.

Avgust 2024.	Na kritičnom koraku		NTC target [MW]	EMS predlog	
	NTC calculated [MW]	MACZT[%]		NTC [MW]	MACZT [%]
RS -> HU	1262	54	1420	700	31
HU -> RS	1024	47	1626	700	35
RS -> BG + RO	/	/	/	/	/
BG + RO -> RS	1013	39	1865	700	22
RS -> BA + HR	1413	51.75	1945	1000	34
BA + HR -> RS	886	57	1126	1000	63
RS -> ME + MK	973	44.4	1594	1300	55
ME + MK -> RS	676	35	1389	1300	67

У ЕМС-овим прорачунима постоји неколико усвојених претпоставки, и то су:

- резултати су приказани са вредностима које су у ЕМС АД прорачунаване са намером да се додели сав расположив капацитет на тржиште електричне енергије; међутим, финалне вредности које су дате на алокацији су вредности хармонизоване са суседним ОПС-ом, усвојене по критеријуму прихватања ниже вредности;
- вредности дате у раду односе се на месечне прорачуне, али су оне веће на дневном нивоу јер се на неколико граница раде прорачуни и усаглашавање дневних вредности NTC-ова, па је искоришћеност мреже већа;
- прорачун мора да обухвати координацију региона за прорачун преносних капацитета и мора се спроводити на европском заједничком моделу како би некоординисани токови снаге из других зона били што мањи.

6. АКЦИОНИ ПЛАН И СТРУКТУРНА ЗАГУШЕЊА У ПРЕНОСНОЈ МРЕЖИ

Уредба (ЕУ) 2019/943 о унутрашњем тржишту електричне енергије прописује обавезу оператора преносних система да стављају на располагање тржишним учесницима најмање 70% расположивих преносних капацитета на интерконекцијама од значаја за прекограничну трговину. Ова уредба је у Енергетску заједницу инкорпорирана Одлуком Министарског савета 15. децембра 2022. године. Члан 15 Уредбе предвиђа да државе уговорне стране морају постепено

повећавати доступне капацитете по линеарној путањи, тако да се до 31. децембра 2027. достигне минимум од 70%. До тог датума, ако постоје структурна загушења, државе морају имати акционе планове за њихово отклањање, али и сваке године повећавати капацитет за прекограничну трговину. Дакле, правило 70% постаје обавезујуће од краја 2027. године, а до тада уговорне стране Енергетске заједнице морају постепено усаглашавати своје капацитете кроз акционе планове и извештавање.

Нови Закон о енергетици обезбеђује национални правни и институционални оквир који омогућава примену и постепено усаглашавање са захтевима Уредбе (ЕУ) 2019/943 и других прописа који произилазе из пакета „Чиста енергија за све Европљане”.

Изменама и допунама Закона о енергетици („Службени гласник РС”, бр. 145/2014, 95/2018 – др. закон, 40/2021 и 94/2024), које су усвојене 21. новембра 2024. године и ступиле на снагу 29. новембра 2024. године, у национални правни оквир су први пут уведене одредбе које транспонују кључне принципе Уредбе (ЕУ) 2019/943 о унутрашњем тржишту електричне енергије.

Према ставу 9, члана 164 Закона о енергетици, оператор преносног система је дужан да обезбеди годишње повећање расположивих преносних капацитета дуж линеарне путање између зона трговања, све до достизања минималних вредности утврђених у складу са чланом 165а Закона о енергетици. Минимални нивои преносних капацитета морају бити достигнути најкасније до 31. децембра 2027. године.

Ниске или променљиве вредности MACZT-а указују на постојање ограничења у преносној мрежи, која нису искључиво последица начина прорачуна прекограничних капацитета, већ су условљена физичком конфигурацијом преносне мреже, капацитетима појединих мрежних елемената и начином расподеле токова у систему. Из тог разлога, анализа MACZT-а представља полазну основу за идентификацију структурних загушења у преносној мрежи.

Због тога је, ради дефинисања ефикасних и одрживих мера у Акционом плану, неопходно идентификовати и анализирати структурна загушења у преносној мрежи, односно трајна или понављајућа мрежна ограничења која доводе до смањења MACZT-а и ограничавају расположивост прекограничних капацитета.

На основу техничких анализа и извештаја које је припремила „Електро мрежа Србије”, идентификована су структурна загушења у преносном систему Републике Србије, која представљају ограничења у

пружању расположивих преносних капацитета за прекограничну трговину електричном енергијом. Ова загушења нису ограничена само на преносни систем Републике Србије већ обухватају и елементе мреже у суседним системима, имајући у виду висок степен међусобне повезаности и заједнички утицај на токове електричне енергије у региону Југоисточне Европе:

1. интерконекција са Босном и Херцеговином (Бајина Башта – Пожега – Вишеград): ограничења услед термичких капацитета и недовољне аутоматизације управљања токовима;
2. интерконекција са Црном Гором (Пљевља–Бистрица);
3. 400 kV ДВ „РП Ђердап – Порциле де Фиер“;
4. ТР 400/110 kV у ТС „Смедерево 3“;
5. 400 kV ДВ „РП Ђердап – РП Дрмно“;
6. ТР 400/110 kV у ТС „Бор 2“;
7. 220 kV ДВ „Обреновац – Београд 3“;
8. 400 kV ДВ „Панчево 2 – Београд 20“;
9. ТР 220/110 kV у ТС „Сремска Митровица 2“.

Акционим планом дефинишу се планиране мере за смањење идентификованих структурних загушења у преносном систему. Планиране мере обухватају:

- развој и оптимизацију мреже;
- проширење мреже;
- координисани прорачун преносних капацитета;
- резерве у мрежи због редиспечинга;
- координацију корективних мера.

Ове мере су груписане у два главна подручја деловања:

1. развој и оптимизација мреже – обухвата прве две тачке;
2. унапређење управљања загушењима – обухвата преостале три тачке.

Развој и оптимизација преносне мреже, распоред реализације ових мера дефинисани су Планом развоја ЕМС АД. Унапређење управљања загушењима одвијаће се на регионалном нивоу у сарадњи са RCC-овима који ће у сарадњи са ОПС-овима спроводити координисане активности.

7. РАЗВОЈ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПРЕНОСНЕ МРЕЖЕ

Како би се адекватно одговорило на будуће изазове, укључујући и нове захтеве дефинисане чланом 16(8) Уредбе о тржишту електричне енергије, одрживо проширење мрежне инфраструктуре представља један од кључних предуслова за поуздан и ефикасан рад система. Преносна мрежа се континуирано развија, а у оквиру циклочног процеса планирања редовно се идентификују будуће потребе и дефинишу одговарајуће мере за њихово испуњење.

ЕМС АД има законом прописане обавезе у циљу обезбеђивања одрживог развоја преносног система Републике Србије.

Кроз своју средњорочну и дугорочну стратегију развоја, у наредном десетогодишњем, односно двадесетогодишњем периоду, ЕМС АД планира обимна улагања у обнову постојећих и изградњу нових преносних капацитета. Ови инфраструктурни објекти ће унапредити поузданост напајања корисника преносног система и повећати прекограничне капацитете за размену електричне енергије, што је од великог међународног (регионалног) значаја. Плански међународни пројекти у којима учествује ЕМС АД, сагледани у оквиру паневропског десетогодишњег плана развоја (TYNDP пакета), као што се може видети на наредној слици, утицаће на повећање преносних капацитета на чак шест граница Републике Србије.



Слика 6. Приказ главних преносних коридора и доминантних праваца токова у електроенергетском систему Србије и региону

У складу са Стратегијом развоја енергетике Републике Србије, плановима развоја производног и дистрибутивног система и пословном стратегијом ЕМС АД, улагања у инфраструктуру за пренос електричне енергије усмерена су на следеће циљеве:

- повећање сигурности рада преносног система и поузданости напајања корисника преносног система, што је и законска обавеза ЕМС АД;
- повећање прекограничних преносних капацитета Републике Србије који имају регионални и паневропски значај;
- уравнотежен, одржив и благовремен развој преносног система са циљем прикључивања нових конвенционалних и обновљивих извора електричне енергије и објеката купаца;
- развој тржишта електричне енергије на националном и регионалном нивоу.

У складу са одредбама Закона о енергетици Републике Србије, ЕМС АД најмање једном на сваке две године доноси план развоја за наредни десетогодишњи период.

Према члану 111 српског Закона о енергетици из 2024. године, неопходни пројекти развоја мреже се сумирају у Плановима развоја мреже, које на сваке две

године израђује оператор преносног система ЕМС АД, а које мора да одобри регулаторно тело.

Снажна и поуздана мрежа је кључни фактор за постизање минималног капацитета који треба да буде доступан за прекограничну трговину, у складу са чланом 16(8) Уредбе.

Десетогодишњи план развоја се сваке године ажурира и има за циљ повећање преносног капацитета, смањење загушења у мрежи и олакшавање постизања циљева. Мере за постизање ових циљева укључују ојачања и оптимизацију постојеће мреже, као и развој нове инфраструктуре. Снажна и поуздана мрежа је кључан чинилац за постизање критеријума 70% из Уредбе. У наредним годинама планирано је ојачање или оптимизација више постојећих далековаода и трансформаторских станица.

У складу са чланом 15(1) Уредбе о тржишту електричне енергије, Акциони план мора да садржи одредбе које се односе на праћење његове примене. Праћење је кључно како би се обезбедило да се планиране мере за повећање капацитета прекограничне трговине и смањење структурних загушења заиста спроводе у складу са дефинисаном линеарном путањом и да се не угрожава сигурност рада електроенергетског система.

8. ЗАКЉУЧАК

Након дефинисања и успостављања оперативног рада региона за координисани прорачун преносних капацитета, прорачуни би се радили на регионалном нивоу у оквиру RCC-ова на координисан начин, најпре за дневни и интрадневни ниво. Применом методолошког приступа заснованог на токовима снаге, за сваки елемент мреже се разматра и сагледава његова оптерећеност.

Кроз координисане прорачуне засноване на токовима снаге у RCC-у, на транспарентнији начин дефинисаће се домени преносних капацитета, који ће тек након берзанских трансакција показати да ли постоје и који су критични елементи у мрежи. При прорачунима се узима у обзир испуњеност услова 70% на сваком критичном елементу из предефинисане листе испада. Ово ће представљати изазов и за планирање и за управљање у реалном времену, када се критичне ситуације са загушењима у мрежи морају отклањати редиспечингом или контратрговином, при чему оба механизма носе финансијске последице.

Искуства из европских земаља које су већ морале да имплементирају правило 70% показују да ОПС-ови, у циљу доделе 70% капацитета, улазе у режим у којем постоје преоптерећења у мрежи. Поставља се питање да ли је то правило *insecurity of 70% rule*. Такође, остају отворена питања да ли постоје довољни потенцијали за контратрговину.

При прорачунима и валидацији преносних капацитета узимају се у обзир и потенцијалне корективне мере (*remedial actions*), које у реалном времену треба спровести када постоји питање њихове изводљивости.

У ЕМС АД сагледана су структурна загушења и у складу са њима израђен је Акциони план за отклањање идентификованих проблема у мрежи. ЕМС АД треба да обезбеди годишње повећање преносних капацитета у линеарној путањи између зона трговања до његове минималне вредности, најкасније до краја 2027. године. Дефинисањем Акционог плана, ЕМС АД добија додатно време за потпуно поштовање MACZT критеријума и додатно јачање инфраструктуре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ENERGY COMMUNITY, CLEAN ENERGY PACKAGE, <https://www.energy-community.org/implementation/package/EL.html>
- [2] Уредба о успостављању смерница за рад међусобно повезаних система за пренос електричне енергије
- [3] Commission Regulation (EU) 2015/1222 of 24 July 2015 establishing a Guideline on Capacity Allocation and Congestion Management (CACM), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015R1222>
- [4] ACER, Day-ahead Capacity Calculation Methodology of the CORE Capacity Calculation Region, Annex Ia, 21 February 2019, https://documents.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/ANNEXESTODECISIONOFTHEAGENCYNo022019/Annex%20I%20-%20ACER%20Decision%20on%20Core%20CCM.pdf
- [5] Закон о енергетици („Службени гласник РС”, бр. 145/2014, 95/2018 – др. закон, 40/2021 и 94/2024)
- [6] Уредба о расподели преносног капацитета и управљање загушењима („Сл. гласник РС”, бр. 102/2024)

БИОГРАФИЈЕ



Марија Ђорђевић је рођена 1972. године у Србији. Дипломирала је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 1997. године. Магистрирала је 2003. године на истом факултету. Докторирала у области енергетике 2013. године на Универзитету у Београду. Тренутно је руководиоца Центра за оперативно планирање и анализу рада преносног система. Области интересовања су краткорочно планирање и анализа рада, тржишни аспекти и имплементација европске регулативе у ЕЕС-у Србије.

ORCID: 0009-0007-6053-0547



Срђан Младеновић је рођен 1982. године у Крушевцу, где је и завршио основно образовање и гимназију. Дипломирао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2010. године. Већ 15 година запослен је у „Електропривреди Србије“, где је прошао комплетан развојни пут. Тренутно ради на позицији руководиоца Сектора за планирање и анализу рада преносног система.

ORCID: 0009-0000-2137-1159



Ивана Стаменић је рођена 1993. године у Ужицу. Основно и средње образовање стекла је у Бајиној Башти. Дипломирала је 2016. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Одсеку за енергетику. Мастер академске студије завршила је 2017. године на истом факултету. Од 2018. године запослена је у „Електропривреди Србије“, тренутно на позицији шефа Службе за планирање рада преносног система.

ORCID: 0000-0003-4851-1937



Бранко Шумоња је рођен 1969. године. Завршио Електротехнички факултет Универзитета у Београду, смер Енергетика. Од 1998. године ради у енергетском сектору Србије, прво у „Електропривреди Србије“, а након тога у „Електропривреди Србије“, од њеног оснивања 2005. године. Прошао је комплетан развојни пут у вези са управљањем преносним системом – од диспечера НДЦ преко разних нивоа руковођења у управљању и планирању рада преносног система. Тренутно је на позицији директора Дирекције за управљање преносним системом.

ORCID: 0009-0007-9931-2598

Marija Djordjević¹, Srdjan Mladenović¹, Ivana Stamenić¹, Branko Šumonja¹

Implementation of European Processes in the Operational Activities of EMS JSC

¹ Joint Stock Company Elektromreza Srbije Belgrade, Serbia*

Professional article

Highlights

- This paper examines the coordinated processes taking place at the level of European Transmission System Operators, as well as the key changes currently being implemented in the operational activities of EMS JSC
- Particular emphasis is placed on the two most important processes, namely coordinated security analysis and coordinated transmission capacity calculation
- A technical framework has been established for defining a region for coordinated capacity calculation in South-Eastern Europe
- The paper also assesses the ability of the Serbian Transmission System Operator to fulfil its regulatory obligation to allocate transmission capacity in accordance with the MACZT methodology

Abstract

At the level of ENTSO-E and across Europe, processes are under way that directly impact the Serbian power sector and the day-to-day operations of the Transmission System Operator. Two key ENTSO-E processes — coordinated security analysis and coordinated transmission capacity calculation — are implemented in a coordinated manner. Within the framework of transmission capacity calculation, two methodological approaches are applied: the Net Transfer Capacity (NTC) method and the flow-based method. This paper presents the regulatory process of EMS JSC joining the European capacity calculation regions — CORE and the South-Eastern Europe (SEE) region — with particular emphasis on the challenges faced by EMS JSC in this context. Furthermore, the fundamental concepts of coordinated processes are outlined, which will be implemented partly within the Transmission System Operator and partly through the regional coordination centres. Irrespective of the transmission capacity calculation methodology applied at different stages, compliance with the rule requiring the allocation of 70% of the capacity of critical network elements is mandatory. The paper presents preliminary results regarding compliance with this requirement, bearing in mind that its implementation is obligatory under the Energy Law.

Keywords

**ENTSO-E, MACZT (Margin Available for Cross-Zonal Trade),
RCC (Regional Coordination Centre), TSO (OPS)**

Received: December 19th, 2025 Reviewed: March 11th, 2026Modified: - / without objection / Accepted: March 12th, 2026

*Corresponding author: Marija Đorđević, +381 64/840-86-69

E - mail: marija.djordjevic@ems.rs

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the paper "Coordinated Processes in EMS AD in Compliance with the Latest European Regulations" (<https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/cigre37-c5-08/>), awarded by Expert Committee EC-C5 Electricity Market and Regulation at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, May 26-30, 2025



УРЕЂИВАЧКА ПОЛИТИКА И ТЕМАТСКЕ ОБЛАСТИ ЧАСОПИСА

При поновном покретању издавања часописа „Електропривреда“ одлучено је да он има научно-стручни карактер и да буде припреман и публикован по новој, широј концепцији и двојезично, на српском и енглеском. При томе ће на енглеском језику бити објављивани само они рукописи за које аутори из Србије и региона исказу такву жељу, а рецензенти и Уредништво процене да имају одговарајући допринос и да би могли бити од интереса и за читалачку публику ван српског говорног подручја. Часопис је, наравно, отворен и за рукописе страних аутора чији су оригинали на енглеском језику. Уз сагласност ових аутора, одобрени рукописи ће бити превођени и објављивани и на српском језику. На српском језику доступне су ћирилична и латинична верзија објављених чланака.

Часопис се, по правилу, издаје два пута годишње, искључиво електронски (*on line*). Часопис је отвореног приступа (*Open Access*), при чему је објављивање прихваћених рукописа бесплатно, без било каквих финансијских обавеза аутора. Са друге стране, такође нема ни финансијских обавеза издавача према ауторима, како пријављених рукописа тако и објављених чланака.

Садржај рукописа пријављеног за објављивање у Часопису мора бити оригинално дело аутора и не сме бити већ објављен или јавно представљен (нити објављен или представљен у међувремену, пре првог објављивања у „Електропривреди“), било где у свету, у било ком облику. Ово правило се неће примењивати на рукописе пријављене за посебна, специјална издања Часописа, која буду посвећена већ презентованим, изабраним радовима са партнерских конференција, при чему такав рукопис мора бити проширен најмање 30% у односу на презентовани конференцијски рад, унапређен и додатно рецензиран по истој процедури као и рукописи пријављени за редовна издања Часописа.

У Часопису се објављују само они рукописи који добију најмање две позитивне рецензије од стране реномираних експерата у области на коју се рукопис односи, односно већину позитивних рецензија, у случају ангажовања већег броја рецензената.

Часопис прихвата на разматрање рукописе и објављује радове научно-истраживачког и стручног карактера, а посебно рукописе/радове у областима:

- нових технологија за обезбеђивање, обраду и коришћење примарних енергената;
- производње, преноса и дистрибуције електричне енергије;
- складиштења и конверзије електричне и топлотне енергије;
- рационалне потрошње електричне и топлотне енергије;
- развоја обновљивих извора енергије;
- информационих и телекомуникационих система;
- организације рада електроенергетског система;
- заштите животне средине;
- ревитализације електроенергетских објеката;
- проналазаштва и иновација;
- реструктурирања и приватизације у енергетском сектору;
- тржишта електричне енергије;
- примене правне регулативе Европске уније у области енергетике;
- друге сродне области.

Часопис је замишљен као платформа и алат за приказивање искустава, конструктивно исказивање и сучељавање ставова, стручне дискусије експерата из струке и праксе и из научно-истраживачких институција и иновативних центара. Наиме, отворена размена њихових мишљења и искустава, по питањима стратешког развоја и одређивања за нове технологије може допринети изналажењу адекватних и оптималних техничко-технолошких, правно-економских и организационо-пословних одговора на све изазове декарбонизације, дигитализације и транзиције електроенергетике ка одрживом развоју.

У име Уредништва,

Др Владимир Шилкут

Главни и одговорни уредник

КАТЕГОРИЗАЦИЈА (РАНГИРАЊЕ) РУКОПИСА

Приликом прегледа рукописа и попуњавања извештаја о томе, рецензенти предлажу, а Уредништво – у случају прихватања рукописа за објављивање – утврђује његову категорију (ранг). Категоризација (рангирање) рукописа врши се према *Правилнику о категоризацији и рангирању научних часописа* („Службени гласник РС”, бр. 80/2024 од 4. 10. 2024) и овде приложеној табели:

Научни чланци:	
Оригинални/изворни научно-истраживачки рад	Рад у коме се износе претходно необјављивани резултати сопствених истраживања научним методом
Прегледни рад	Рад који садржи оригиналан, детаљан и критички приказ истраживачког проблема или подручја у коме је аутор остварио одређени допринос
Кратко или претходно саопштење	Оригинални научни рад пуног формата, али мањег обима или прелиминарног карактера
Научна критика, односно полемика и осврти	Расправа на одређену научну тему заснована искључиво на научној аргументацији и коришћењем научне методологије
Стручни чланци:	
Стручни рад	Прилог у коме се нуде искуства корисна за унапређење професионалне праксе, али која нису нужно заснована на научном методу
Информативни прилог	Уводник, коментар и сл.
Приказ	Приказ књиге, рачунарског програма, случаја, научног догађаја и сл.
Стручна критика, односно полемика и осврти	Расправа/дискусија на одређену стручну тему

УДК: (уноси Редакција)

Први А. Аутор¹, Други Б. Аутор², Трећи В. Аутор³, ...

Упутство за припрему радова - наслов рада

(НЕ ВИШЕ ОД ЧЕТИРИ РЕДА)

¹ Афилијација првог аутора - институција, град, земља*² Афилијација другог аутора - институција, град, земља (ако се разликује од 1)³ Афилијација трећег аутора - институција, град, земља (ако се разликује од 1,2)

...

DOI: (уноси Редакција)

Категорија рада: (уноси Редакција)

Кључне поруке

- У највише четири кратке ставке/bullets треба изложити кључне аспекте и поруке рада
- Реченице ових ставки морају бити кратке, језгровите, помоћни глаголи могу бити изостављени
- Нпр: Упутством сагледани структура и обликовање рада за публикување

Кратак садржај

Кратак садржај рада треба да садржи сажет опис проблема, примењене методе и закључке. Он је есенцијални део рада и треба да буде јасан и концизан. Кратак садржај треба да буде информативан, дајући преглед проблематике, поступка и главних закључака, резултата и њиховог значаја. Не треба писати у првом лицу, не наводити референце и једначине и избегавати скраћенице. Не треба да садржи више од 300 речи (на српском) до 350 (на енглеском, укључујући и одређене и неодређене чланове испред именица).

Кључне речи

Навести до максимално шест кључних речи, одвојених међусобно запетама

Примљено: (уноси Редакција) Рецензирано: (уноси Редакција)

Измењено: (уноси Редакција) Одобрено: (уноси Редакција)

*Кореспондирајући аутор: (име и презиме, телефон)

Имејл:

1. УВОД

У часопису „Електропривреда” се објављују категорисани чланци: оригинални научни радови, претходна саопштења, прегледни и стручни радови из области електропривреде и енергетике.

Сви радови подлежу рецензији. За оригиналност рада, квалитет и веродостојност резултата одговорни су искључиво аутори. Предајом рада аутори прихватају сва правила наведена у овом упутству.

Овај документ садржи упутства за припрему радова. Моле се аутори да се у припреми радова у потпуности придржавају овог упутства како би се избегли проблеми при штампању рада.

Документ је узорак за *Microsoft Word* (верзија 7 и виша) и уједно је и пример жељеног изгледа рада. У њему су садржане све потребне информације о формату рада, типу и величини фонтова, као и правила која објашњавају поступке у вези са једначинама, мерним јединицама, сликама, табелама и осталим деловима рада.

Комплетан рад који садржи рукопис, табеле, графиконе, цртеже, фотографије и пуна имена и презимена аутора са афилијацијама треба доставити постављањем онлајн на апликацију за руковање рукописима, доступну на веб-сајту Часописа, <https://epijournal.eps.rs/prijava> или, алтернативно, слањем на имејл адресу: epijournal.editor@eps.rs.

Обим рада је највише десет страна (не рачунајући списак литературе и наслов, кључне поруке, кратак садржај и кључне речи на енглеском језику), осим у случајевима прегледних радова и специјалних издања Часописа са проширеним награђеним радовима са конференција, у ком случају број страница није ограничен, али се препоручује да буде до 16.

Оригинал рада треба да буде презентован у формату A4 (210x297) mm. Текст рада треба да буде поравнат по обе маргине. Све маргине треба да буду подешене на 2 cm. Текст рада треба да буде урађен са *single* проредом. Рад може бити написан на српском или енглеском језику. (Уредништво одлучује који радови ће бити преведени и на други језик, како би били доступни што већем скупу читалаца.) Величина фонтова за поједине делове текста је као у овом Упутству. У раду треба избегавати целовита математичка извођења. Неопходна извођења могу се дати, по потреби, као целине, у виду једног или више прилога.

Овај документ може се директно преузети са веб адресе <https://epijournal.eps.rs> и користити као подлога за припрему рукописа, једноставним уношењем делова текста рада на одређена места у овом документу.

Препорука је да текст рада почне уводом у коме се формулишу проблем и задатак рада. Даје се преглед и коментар коришћене литературе из наведене области и указује на позицију и допринос рада у односу на наведену литературу.

2. НАСЛОВ ПОГЛАВЉА (на пример: ПРИПРЕМА ТЕКСТА)

Ради веће јасноће текст рада треба поделити на поглавља и потпоглавља. Поглавља и потпоглавља треба нумерисати арапским бројевима, потпоглавља бројевима раздвојеним тачком. Наслове поглавља и потпоглавља од текста пре и после наслова одвојити једним празним редом. Треба избегавати прелом текста на наслову или поднаслову у тексту.

2.1 Нивои потпоглавља

Са потпоглављима није пожељно ићи ниже од другог нивоа, на пример 2.1, 3.3 и сл.

2.1.1 Трећи ниво потпоглавља. Дозвољен је само изузетно, уколико доприноси методолошкој и генералној јасноћи текста рада и пише се, као и наслови потпоглавља, болдираним малим словима, али се завршавају тачком, након које, у наставку тог реда и писана нормалним фонтом, почиње прва реченица тог потпоглавља.

2.2 Позиционирање табела и графичких прилога

Табеле, слике и графици могу, по потреби, да буду у једној колони или преко обе колоне. Све слике и табеле треба да буду постављене у текст близу, али никако испред, места у тексту на коме се први пут помињу. Слике и табеле у прилозима треба да буду означене на исти начин као у тексту рада.

2.3 Прва страна

На средини прве стране наводи се наслов рада *bold* словима величине 16, типа *Times New Roman*. Испод наслова наводе се пуна имена и презимена аутора словима величине 11. Испод имена и презимена наводе се афилијације аутора, словима величине 10. После навођења података о ауторима, на првој страни се наводе кључне поруке рада, резиме рада и кључне речи, словима величине 11.

Уколико је рад писан и за објављивање одобрен само на српском језику, после садржаја описаног у претходном пасусу, у коначној верзији рада за публикување наводе се и наслов рада, кључне поруке, резиме рада и кључне речи на енглеском језику.

Уколико је рад писан на енглеском језику и одобрен за објављивање, у целости се преводи и објављује и на српском језику, у идентичном форматирању.

Уколико је рад писан на српском језику и одобрен за објављивање на оба језика, у целости се преводи и објављује и на енглеском, у идентичном форматирању.

У доњем левом углу прве стране треба дати пуне податке потребне за остварење контакта са првим аутором рада.

Све ово се једноставно реализује коришћењем датог модела прве стране једноставним уношењем предвиђеног текста на за то предвиђена места у Упутству.

2.4 Поднаслов (на пример: Текст рада)

Текст рада се једноставно уноси уместо текста упутства у овај формат уношењем или копирањем делова текста који су урађени у складу са овим упутством на за то предвиђене места у упутству.

2.5 Једначине

Једначине треба поставити на средину текста и нумерисати их арапским бројевима у малим (округлим) заградама уз десну маргину текста. За једначине треба користити математички софтвер (*Microsoft Equation Editor for MS Word* или *MathType*). На пример:

$$I_F = I_B = -I_C = \frac{-J\sqrt{3}E_A}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

Једначине треба одвојити од текста пре и текста после размаком од 6 поинта. Символи који се користе у једначини морају бити дефинисани пре него што се појаве у једначини или непосредно после једначине. Позивање на неку једначину у тексту врши се навођењем броја једначине у малој загради (1). Ако се реченица почиње позивом на једначину тада користити „Једначина (1) је ...”.

2.6 Табеле

Табеле треба да буду убачене у текст на местима где се први пут помињу или непосредно после. Треба да буду означене римским бројевима, а број и назив табеле треба да буду изнад табеле. На пример:

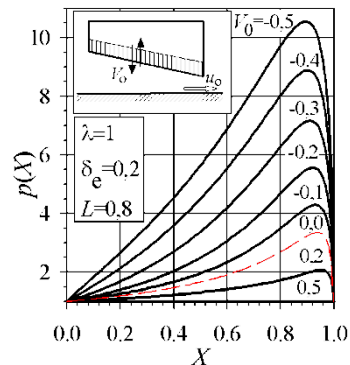
Табела 1 Трајање симулација и заузеће меморије

ИСЦАС	ЦПУ време [с]	заузеће меморије [МБ]
ц17	2	3.9
ц432	62	68.7
ц880	160	152.6
ц1355	283	178.8

2.7 Сlike

Сlike треба да буду брижљиво припремљене и унесене у текст на предвиђено место. Број и назив сlike морају бити испод сlike. Бројеве сlike означавају арапским бројевима. Ради бољег разумевања избегавати прекомерне информације на сликама. Сви коментари који се односе на сlike треба да се налазе у заглављу. Куцане ознаке треба да буду изабране пажљиво да би се обезбедила јасноћа. Покушати да се осе на сликама опишу и речима, не

само симболима. На пример, боље је написати *време t*, него само *t*. Ознаке за мерне јединице треба ставити у заграде.



Слика 1. Опис сlike

3. ЗАКЉУЧАК

Иако закључак треба да садржи преглед кључних резултата рада, у њему не треба понављати део наведен у кратком садржају. Закључак може да објасни значај рада или предложи могуће примене остварених резултата и да смернице за даља истраживања проблематике третиране у раду.

ЗАХВАЛНИЦА

Захвалнице за спонзорство, финансирање или помоћ у раду, ако их има, треба да буду као посебан, нумерисан део пре списка литературе. У наслову користити јединицу и када има више захвалница.

ЛИТЕРАТУРА

Списак коришћене литературе треба да буде на крају рада у посебном, нумерисаном делу. Референце се нумеришу арапским бројевима у средњим (угластим) заградама, по редоследу цитирања у тексту рада. При навођењу обратити пажњу на то да референце буду тачне и комплетне, тј. да потпуно описују изворе података.

Све наведене референце морају бити директно цитиране у самом тексту рада навођењем броја референце у средњој (угластој) загради. Не ограничавати се само на навођење својих референци, већ навести и релевантне референце из посматране области.

У наставку се дају примери начина навођења литературе: рад објављен у часопису [1], књига [2], поглавље у књизи више аутора [3], рад објављен у зборнику радова са конференције [4] и чланак преузет са веб сајта [5].

- [1] Šiljak D. D, Stipanović D. M, “Robust Stabilization of Nonlinear Systems – the LMI Approach”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 6, No. 5, pp. 461-493, 2000.

- [2] Марковић З., „Гранична стања челичних конструкција према еврокоду”, Академска мисао, Београд, 2014.
- [3] Deavours D., “UHF RFID Antennas”, in: Bolić M. (Ed.), *RFID Systems – Research Trends and Challenges*, Ch. 3, Wiley, New York, 2010.
- [4] Ocokoljić G., Živković S., Subotić S., “Aerodynamic Coefficients Determinations for the ATM Model with Lateral Jets Simulation – Experimental and Numerical Methods”, *Proc. 4th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2011*, Belgrade, Serbia, pp. 17-22, 6-7 October 2011.
- [5] Вукић Б., „Друштвене игре за високопозициониране пословне људе” [Internet]. Beograd; Novi Sad: Adizes Southeast Europe; 2010 [citirano 19.03.2012]. Dostupno na: <http://www.asee.rs/?page=142&oi=69>

ДОДАТАК (ПРИЛОГ) 1

Додаци, уколико су неопходни, треба да буду наведени после Литературе. Ако их има више, треба да буду нумерисани арапским бројевима. У случају да прилози садрже табеле или слике, они се нумеришу словом „А” иза кога следи тачка и редни број (и то: за табеле римски, од „I” надаље, редом јединствено за све прилоге; а за слике арапски, од „1” надаље, јединствено за све прилоге).

ДОДАТАК (ПРИЛОГ) 2

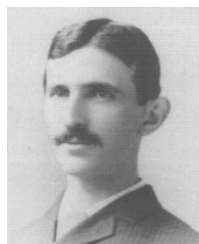
У зависности од њиховог садржаја, прилози могу бити форматирани двостубачно или једностубачно. У случају када то читаоцу омогућава бољу прегледност, слике и табеле у прилозима могу бити заротиране улево за 90°.

Табела А.1 Назив прве табеле у Прилогу

Заглавље	Колона 1	Колона 2	Колона 3	Колона 4	Колона 5	Колона 6	Колона 7
Ред 1							
Ред 2							
Ред 3							
Ред 4							
Ред 5							
Ред 6							

БИОГРАФИЈЕ

Треба дати кратку биографију за сваког аутора. Почети именом и презименом аутора и дати његову кратку, претежно стручну биографију. Треба укључити и фотографију аутора. Пример биографије је дат у наставку.



Никола Тесла је рођен у Смиљану у Аустријском царству, 9. јула 1856. Завршио је Аустријску политехничку школу у Грацу и студирао на Универзитету у Прагу. Његово радно искуство укључивало је *American Telephone Company*, Будимпешта, *Edison Machine Works*, *Westinghouse Electric Company* и *Nikola Tesla Laboratories*. Његова посебна поља интересовања су биле области високих фреквенција. Тесла је добио

почасне дипломе од институција високог образовања укључујући Универзитет Колумбија, Универзитет Јејл, Универзитет у Београду и Универзитет у Загребу. Добио је медаљу *Elliott Cresson* Института Френклин и Едисонову медаљу IEEE. Године 1956. термин *тесла* (Т) је усвојен као јединица за густину магнетног флукса у систему MKSA. Године 1975. Електроенергетско друштво (*Power Engineering Society*) је установило награду Никола Тесла у његову част. Тесла је преминуо 7. јануара 1943. године. ORCID: xxxx-yyyy-zzzz-www.

/ Сваки аутор треба да наведе свој ORCID број (*Open Researcher and Contributor ID*), уколико га поседује /

Аутори су обавезни да Редакцији часописа, по прихватању рада, доставе и потписану изјаву о ауторству, оригиналности рукописа и преносу ауторских права, чији се образац може преузети са сајта Часописа, <https://epijournal.eps.rs>.

/ Обрисати бокс с овим текстом при изради рада /

UDC: (Editor's input)

First A. Author¹, Second B. Author², Third C. Author³, ...

Instructions for the preparation of article - the title of the article

(NOT MORE THAN FOUR LINES)

¹ Affiliation of the first author - institution, city, country*² Affiliation of the second author - institution, city, country (if differs from 1)³ Affiliation of the third author - institution, city, country (if differs from 1, 2)

...

Category of article: (Editor's input)

Highlights

- Key aspects and messages of the work should be presented in a maximum of four short items/bullets
- The sentences of these items must be short, concise, auxiliary verbs can be omitted
- E.g.: The structure and design of work for publication are considered by the instruction

Abstract

The Abstract of the article should contain a concise description of the problem, applied methods and conclusions. It is an essential part of the article and should be clear and concise. The Abstract should be informative, giving an overview of the issues, the procedure and the main conclusions, results and their significance. Do not write in the first person, do not list references and equations, and avoid abbreviations. It should not contain more than 300 words (in Serbian) to 350 (in English, including definite and indefinite articles before nouns).

Keywords

Specify up to six keywords, separated by commas

Received: (Editor's input)

Reviewed: (Editor's input)

Modified: (Editor's input)

Accepted: (Editor's input)

*Corresponding author: (name, phone)

E - mail:



*In memoriam***Проф. др Владимир Катић**

(1954–2026)

Са дубоком тугом обавештавамо читалачку публику, ауторе и сараднике нашег часописа да нас је после краће и кобне болести, почетком априла 2026, напустио председник нашег Уређивачког одбора, професор доктор Владимир Катић.

Владимир Катић је дипломирао 1978. године на Факултету техничких наука (ФТН) у Новом Саду, а магистрирао је 1981. и докторирао 1991. на Електротехничком факултету у Београду. Био је врхунски научник и педагог, угледни професор ФТН-а у Новом Саду, у неколико мандата и његов продекан.

Током своје импресивне каријере, објавио је преко 600 научних радова и 22 монографије и уџбеника. Са близу 2100 цитата и *h*-индексом 20 (према Google Scholar-у), професор Катић је био један од најутицајнијих истраживача у областима енергетске електронике и квалитета електричне енергије, обновљивих извора и електричних возила. Као рецензент са више од 500 признатих рецензија, био је изузетно цењен у уредништвима најпрестижнијих светских научних часописа.

Професор Катић је оставио неизбрисив траг у научној и стручној јавности. Својим преданим радом, изузетним знањем и визијом значајно је допринео развоју електротехнике, као и угледу наше научне заједнице у свету. Био је покретач и дугогодишњи организатор бројних научних скупова, међу којима се посебно издваја конференција „Енергетска електроника”, захваљујући којој су наши универзитети и наши стручњаци стекли препознатљиво место на међународној научној мапи.

Као Life Member IEEE, професор Катић је био оличење доживотне посвећености инжењерској струци. До последњег дана био је активан као Chair IEEE Life Member Affinity Group. Био је дугогодишњи Chair IEEE Joint Chapter for Industry Applications, Industrial Electronics and Power Electronics (IE-13/IA-34/PEL-35), где је својим знањем, ауторитетом и организационим способностима спајао науку и индустрију. Од 2006. до 2010. године био је председник националне секције IEEE Србија и Црна Гора.

Био је члан извршних одбора међународних асоцијација попут ЕРЕ (Брисел) и РЕМС (Будимпешта). председавао је бројним конференцијама, од којих се посебно издваја ЕРЕ-РЕМС 2012 ЕССЕ Europe, која је Нови Сад и Србију поставила у центар светске енергетске електронике.



УДК: 621.3:929 Катић В.

<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.7>

Последњи велики скуп из ове области који је професор Катић организовао и водио био је XXIII међународни симпозијум о енергетској електроници (Ее 2025), одржан од 8. до 10. октобра 2025. године у Београду и Новом Саду.

Као један од најистакнутијих стручњака у овој области, био је оснивач и председник Друштва за енергетску електронику Србије, председник Друштва за ЕТРАН, улажући своје знање, енергију и организационе способности у континуитет и стално унапређивање једне од најзначајнијих научних конференција у региону.

Био је и дугогодишњи председник Стручне комисије 2 – *Квалитет електричне енергије у електродистрибутивним системима* националног комитета CIRED Србија, чији је био оснивач и члан његовог Извршног одбора. Дао је огроман допринос овој области електроенергетике, раду и развоју и овог удружења и унапређењу нивоа саветовања које је оно организовало у протекле три деценије.

Од обнове издавања часописа „Електропривреда”, 2023. године, професор Катић је био на челу Уредништва, дајући велики допринос напорима да часопис поново буде покренут, да заживи и стално напредује. До својих последњих дана активно је учествовао и у припреми овог издања, чак не откривајући чињеницу да се бори с опаком болешћу. Утолико је његов одлазак био изненађујући за све сараднике, а губитак тежи и ненадокнадив. За сваког ко је икад имао част и задовољство да сарађује са њим, међутим, и такав његов став и подвиг су разумљиви, јер су професора Катића красиле огромна радна енергија, пожртвованост, посвећеност напретку струке и науке, а уза све то и благост, смиреност, велико господство и достојанственост. На исти начин на који је живео и делао, напустио је овај материјални свет, остављајући у њему трајан траг, а свима који су га познавали – жал и лепе успомене.

Са великим поштовањем и захвалношћу,

Уредништво

У прилогу овог меморијалног, кратког приказа каријере и дела професора Владимира Катића дајемо Извод из његове обимне библиографије

Извод из библиографије проф. др Владимира Катића

Књиге, уџбеници и монографије (на српском језику):

1. **Владимир Катић**, Енергетска електроника 1: Компоненте и АС/х претварачи, универзитетски уџбеник, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2020, ISBN: 978-86-6022-243-7
2. **Владимир Катић**, Енергетска електроника 2: DC/х претварачи и напајачи, универзитетски уџбеник, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2020, ISBN: 978-86-6022-266-6
3. **Владимир Катић**, Решени задаци из Енергетске електронике 1, уџбеник, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2020, ISBN: 978-86-6022-264-2
4. **Владимир Катић**, Стеван Грабић, Иван Тодоровић, Золтан Чорба, Практикум из енергетске електронике, универзитетски практикум/уџбеник, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2016, ISBN: 978-86-7892-835-2
5. **Владимир Катић**, Амир Токић, Татјана Коњић, Квалитет електричне енергије, књига, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2007, ISBN: 978-86-7892-064-6
6. **Владимир Катић**, Изудин Капетановић, Вангел Фуштић, Обновљиви извори електричне енергије, књига, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2007, ISBN: 978-86-7892-066-0
7. **Владимир Катић**, Владо Поробић, Дарко Марчетић, Примена микропроцесора у енергетици: практикум лабораторијских вежби, уџбеник, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2006, ISBN: 86-7892-013-0; 978-86-78920-13-4
8. **Владимир Катић**, Квалитет електричне енергије – виши хармоници: монографија, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2002, ISBN: 86-80249-57-2
9. **Владимир Катић**, Дарко Марчетић, Душан Граовац, Енергетска електроника: практикум лабораторијских вежби, уџбеник, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2000, ISBN: 86-499-0081-X
10. **Владимир Катић**, Енергетска електроника: збирка решених задатака, уџбеник, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1987, COBISS-ID: 195530249
11. **Владимир Катић**, Борислав Пантић, Збирка решених задатака из индустријске електронике, уџбеник, Научно-образовни институт за енергетику и електронику, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1980, COBISS-ID: 39513095

Одабрани чланци из међународних часописа (од 2000. године):

1. Joeri Van Mierlo, Michael Fowler, **Vladimir Katic**, Aymeric Rousseau and Peter Van den Bossche, "Establishment of Ten New Sections in WEVJ2", Editorial, *World Electric Vehicle Journal*, Vol.16, No.521, 16.09.2025, pp. 1-3, <https://doi.org/10.3390/wevj16090521>
2. Nebojša Horvat, Dušan B. Gajić, Petar Trifunović, Veljko B. Petrović, Dinu Dragan, **Vladimir A. Katić**, "Performance Evaluation of a Distributed Ledger-Based Platform for Renewable Energy Trading", *IEEE Access*, Vol. 14, 19.06.2024, pp. 86013-86033, DOI: [10.1109/ACCESS.2024.3416612](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3416612)
3. **Vladimir Katić**, "PV Solar Energy Supply in Smart Cities", *IPSI Transactions on Internet Research*, Vol.18, No.1, April 2022, pp. 28-33, DOI: [10.58245/ipsi.tir.22jr.06](https://doi.org/10.58245/ipsi.tir.22jr.06)
4. Radovan Turović, Dinu Dragan, Gorana Gojić, Veljko B. Petrović, Dušan B. Gajić, Aleksandar M. Stanisavljević and **Vladimir A. Katić**, "An End-to-End Deep Learning Method for Voltage Sag Classification", *Energies*, Vol.15, No 8, 2898, 15.04.2022, <https://doi.org/10.3390/en15082898>
5. Dušan B. Gajić, Veljko B. Petrović, Nebojša Horvat, Dinu Dragan, Aleksandar Stanisavljević, **Vladimir Katić** and Jelena Popović, "A Distributed Ledger-Based Automated Marketplace for the Decentralized Trading of Renewable Energy in Smart Grids", *Energies*, Vol.15, No 6, 2121, 14.03.2022, <https://doi.org/10.3390/en15062121>
6. Aleksandar Stanisavljević, **Vladimir A. Katic**, Srđan Lj. Milicevic, "A Method for Real-Time Prediction of the Probability of Voltage Sag Duration Based on Harmonic Footprint", *IEEE Access*, Vol. 10, 24.02.2022, pp. 23757-23773, DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3154058](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3154058)
7. Zoltan Čorba, Bane Popadić, Dragan Milićević, Boris Dumnić and **Vladimir Katić**, "A Long-Term Condition Monitoring and Performance Assessment of Grid Connected PV Power Plant with High Power Sizing Factor under Partial Shading Conditions", *Energies*, MDPI, Switzerland, Vol.13, No.4810, pp.1-20, 14.09.2020., Open Access, [Online]. Available: DOI: [10.3390/en13184810](https://doi.org/10.3390/en13184810)
8. Aleksandar Stanisavljevic, **Vladimir A. Katic**, Boris Dumnić and Bane Popadić, "A comprehensive overview of digital signal processing methods for voltage disturbance detection and analysis in modern distribution grids with distributed generation", *Acta Polytechnica Hungarica*, ISSN: 0278-0046, Vol. 16, No.5, June 2019, pp.125-149, DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.16.5.2019.5.8>

9. Aleksandar Stanisavljevic and **Vladimir A. Katic**, "Magnitude of voltage sags prediction based on harmonic footprint for application in DG control system", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, USA, ISSN: 0278-0046, Vol. 66, No.11, Nov.2018, pp. 8902-8912, [Online]. Available: DOI: [10.1109/TIE.2018.2881934](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2881934)
10. **Vladimir A. Katic**, Aleksandar M. Stanisavljevic, "Smart Detection of Voltage Dips Using Voltage Harmonics Footprint", *IEEE Transaction on Industry Application*, Vol.54, No.5, Sep./Oct. 2018, pp.5331-5342, ISSN 0093-9994, [Online]. Available: DOI: [10.1109/TIA.2018.2819621](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2819621)
11. Bane P. Popadic, Boris P. Dumnic, Dragan M. Milicevic, **Vladimir A. Katic** and Damir Šljivic, "Grid connected converter control during unbalanced grid conditions based on delay signal cancellation", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, ISSN 2050-7038, Vol.28, No.12, e2636, June 2018, [Online]. Available: DOI: <https://doi.org/10.1002/etep.2636>
12. Saša Mujović, Slobodan Djukanović, **Vladimir A. Katic**. "Simultaneous Operation of Personal Computers and Mathematical Assessment of Their Harmonic Impact on the Grid", *Advanced Technologies, Systems, and Applications*; Editors: Mirsad Hadžikadić and Samir Avdaković, Lecture Notes in Networks and Systems 3, Springer International Publishing AG, 2017. pp.57-79., [Online]. Available: DOI: [10.1007/978-3-319-47295-9_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47295-9_2)
13. Zoltan Corba, **Vladimir A. Katic**, Bane Popadic, Dragan Milicevic, "New string reconfiguration technique for residential PV system generation enhancement", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, ISSN: 1582-7445, Vol. 16, No.1, Feb. 2016, pp.19-26, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2016.01003>
14. Saša Mujović, Slobodan Djukanović, Vladan Radulović, **Vladimir A. Katic**, "Multi-parameter mathematical model for determination of PC cluster total harmonic distortion of input current", *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, ISSN 0332-1649, Vol. 35, No.1, Jan. 2016, pp.305-325, [Online]. Available: DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/COMPEL-03-2015-0149>,
15. Ivan Subotic, Nandor Bodo, Emil Levi, Boris Dumnic, Dragan Milicevic, **Vladimir A. Katic**, "Overview of Fast On-Board Integrated Battery Chargers for Electric Vehicles Based on Multiphase Machines and Power Electronics", *IET Electric Power Applications*, ISSN 1751-8660, Vol.10, Issue.3, March 2016, pp.217-229, [Online]. Available: DOI: [10.1049/iet-epa.2015.0292](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2015.0292)
16. Boris P. Dumnic, Dragan M. Milicevic, Bane P. Popadic, **Vladimir A. Katic**, Zoltan J. Corba, "Speed-Sensorless Control Strategy for Multi-Phase Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems", *Thermal Science*, ISSN 0354-9836, Vol. 20, Suppl. 2, 2016, pp. S481-S493, [Online]. Available: DOI: [10.2298/TSCI151019032D](https://doi.org/10.2298/TSCI151019032D)
17. Boris Dumnic, Bane Popadic, Dragan Milicevic, **Vladimir Katic**, Djura Oros, "Artificial intelligence based vector control of induction generator without speed sensor for use in wind energy conversion system", *International Journal of Renewable Energy Research*, ISSN 1309-0127, Vol.5, No.1, 2015, pp.299-307. [Online]. Available: https://ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/2030/pdf_41
18. Evgenije M. Adžić, Vlado B. Porobić, Marko S. Vekić, Zoran R. Ivanović, **Vladimir A. Katic**, "Vector-Controlled Induction Motor Drive with Minimal Number of Sensors", *Electronics*, ISSN 1450-5843, Vol.19, No.1, June 2015, pp.21-31. DOI: [10.7251/ELS1519021A](https://doi.org/10.7251/ELS1519021A)
19. **Vladimir A. Katic**, Boris Dumnić, Zoltan Čorba, Dragan Milićević, „Electrification of The Vehicle Propulsion System – An Overview”, *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, ISSN 0353-3670, Vol.27, No.2, 2014, pp.299-316, [Online]. Available: DOI: [10.2298/FUEE1402299K](https://doi.org/10.2298/FUEE1402299K).
20. Saša Mujović, Slobodan Djukanović, Vladan Radulović, **Vladimir Katic**, Mladen Rašović, "Least Squares Modeling of Voltage Harmonic Distortion Due to PC Cluster Operation", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, ISSN: 1582-7445, Vol. 13, No.4, 2013, pp.133-138, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2013.04022>
21. Evgenije M. Adzic, Milan S. Adzic, **Vladimir A. Katic**, Darko P. Marcetic, Nikola L. Celanovic, "Development of High-Reliability EV and HEV AC Propulsion Drive with Ultra-Low Latency HIL Environment", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, ISSN 1551-3203, Vol. 9, No.2, May 2013, pp.630-639, [Online]. Available: [10.1109/TII.2012.2222649](https://doi.org/10.1109/TII.2012.2222649)
22. Dragan Milićević, **Vladimir A. Katic**, Zoltan Čorba, Marian Greconici, „New Space Vector Scheme for VSI Supplied Dual Three-Phase Induction Machine“, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, ISSN: 1582-7445, Vol. 13, No.1, Feb.2013, pp.59-64, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2013.01010>
23. Velimir Lj. Strugar, **Vladimir A. Katic**, Jovica V. Milanovic, "Generic Model of Coastal Distribution Network for Power System Harmonics Studies", *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, Vol. 89, No.1a, Jan. 2013, pp.149-155. [Online]. Available: <http://pe.org.pl/articles/2013/1a/40.pdf>
24. Marko Vekić, Stevan Grabić, Dušan Majstorović, Ivan Čelanović, Nikola Čelanović, **Vladimir A. Katic**, "Ultralow Latency HIL Platform for Rapid Development of Complex Power Electronics Systems", *IEEE Transaction on Power Electronics*, ISSN 0885-8993, Vol. 27, No.11, Nov.2012, pp.4436-4444, [Online]. Available: [10.1109/TPEL.2012.2190097](https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2190097)

25. Zoran R. Ivanovic, Evgenije M. Adzic, Marko S. Vekic, Stevan U. Grabic, Nikola L. Celanovic, **Vladimir A. Katic**, "HIL Evaluation of Power Flow Control Strategies for Energy Storage Connected to Smart Grid Under Unbalanced Conditions", *IEEE Transaction on Power Electronics*, ISSN 0885-8993, Vol. 27, No.11, Nov.2012, pp.4699-4710, [Online]. Available: [10.1109/TPEL.2012.2184772](http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2012.2184772)
26. Boris Dumnic, **Vladimir A. Katic**, Veran Vasic, Dragan Milicevic, Marko Delimar, "An Improved MRAS Based Sensorless Vector Control Method for Wind Power Generator", *Journal of Applied Research and Technology – JART*, ISSN: 1665-6423, Vol. 10, No. 5, October 2012, pp. 687-697, [Online]. Available: http://www.jart.ccadet.unam.mx/volumen10_5.htm
27. Zoltan J. Čorba, **Vladimir A. Katic**, Boris P. Dumnić, Dragan M. Milićević, "In-Grid Solar-to-Electrical Energy Conversion System Modeling and Testing", *Thermal Science*, ISSN 0354-9836, Vol. 16, Suppl.1, 2012, pp. S159-S171, [Online]. Available: DOI: [10.2298/TSCI120224069C](http://dx.doi.org/10.2298/TSCI120224069C).
28. **Vladimir A. Katic**, Boris P. Dumnić, Nenad A. Katic, Dragan M. Milićević, Stevan U. Grabić, „Potentials and Market Prospects of Wind Energy In the Province of Vojvodina“, *Thermal Science*, ISSN 0354-9836, Vol. 16, Suppl.1, 2012, pp. S141-S157, [Online]. Available: DOI: [10.2298/TSCI120229068K](http://dx.doi.org/10.2298/TSCI120229068K)
29. Duško Majstorović, Ivan Čelanović, Nikola Teslić, Nikola Čelanović, **Vladimir A. Katic**, „Ultralow-Latency Hardware-in-the-Loop Platform for Rapid Validation of Power Electronics Designs“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ISSN: 0278-0046, Vol. 58, No.10, Oct.2011, pp.4708-4716, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2011.2112318>
30. Jovan Knežević, **Vladimir Katic**, "Hybrid Method for On-line Harmonic Analysis", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, ISSN: 1582-7445, Vol. 11, No.3, 2011, pp.29-34, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2011.03005>.
31. **Vladimir A. Katic**, Saša V. Mujović, Vladan M. Radulović, Jadranka S. Radović: „The Impact of the Load Side Parameters on PC Cluster's Harmonics Emission“, *Advances in Electronics and Computer Engineering*, ISSN: 1582-7445, Vol. 11, No.1, 2011, pp.103-110. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2011.01017>
32. Saša Mujović, **Vladimir Katic** and Jadranka Radović, "Improved Analytical Expression for Calculating Total Harmonic Distortion of PC Clusters", *Electric Power Systems Research*, ISSN: 0378-7796, 2011, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.01.023>
33. Saša Mujović, **Vladimir Katic** and Jadranka Radović, "Power quality based classification and modelling of small loads and generators", *International Journal on Electrical Engineering Education*, ISSN: 0020-7209, Vol.47, No.3, July 2010, pp.229-247, [Online]. Available: <https://doi.org/10.7227/IJEEE.47.3.1>
34. Ivan Čelanović, Peter Haessig, Eric Carol, **Vladimir Katic**, Nikola Čelanović, "Real-Time Digital Simulator: Enabling Rapid Development of Power Electronics", *Electronics*, ISSN 1450-5843, Vol.14, No.1, June 2010, pp.15-19, [Online]. Available: http://electronics.etfbl.net/journal/Vol14No1/xPaper_03.pdf
35. Velimir Strugar, **Vladimir Katic**, "Power Quality Measurement in a Modern Hotel Complex", *Electronics*, ISSN 1450-5843, Vol.14, No.1, June 2010, pp.98-102, [Online]. Available: http://electronics.etfbl.net/journal/Vol14No1/xPaper_19.pdf.
36. Evgenije Adžić, Zoran Ivanović, Milan Adžić, **Vladimir Katic**: "Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control", *Acta Polytechnica Hungarica, Journal of Applied Sciences*, ISSN 1785-8860, Vol.6, No.1, 2009, pp.131-149, [Online]. Available: https://uni-obuda.hu/journal/Adzic_Ivanovic_Adzic_Katic_17.pdf
37. Stevan Grabić, Nikola Čelanović, **Vladimir Katic**: "Permanent Magnet Synchronous Generator Cascade for Wind Turbine Application", *IEEE Transaction on Power Electronics*, ISSN 0885-8993, Vol.23, No.3, May 2008, pp.1136-1142, [Online]. Available: DOI: [10.1109/TPEL.2008.921181](http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2008.921181).
38. Dušan Graovac, **Vladimir Katic**, Alfred Rufer: "Power Quality Problems Compensation with Universal Power Quality Conditioning System", *IEEE Transaction on Power Delivery*, ISSN 0885-8977, Vol.22, No.2, April 2007, pp.968-976, [Online]. Available: DOI: [10.1109/TPWRD.2006.883027](http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2006.883027)
39. **Vladimir Katic**, Jovan Knežević, Dusan Graovac: "Application-Oriented Comparison of the Methods for AC/DC Converter Harmonics Analysis", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, ISSN 0278-0046, Vol. 50, No. 6, 2003, pp.1100-1108, [Online]. Available: DOI: [10.1109/TIE.2003.819580](http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2003.819580)
40. **Vladimir Katic**, Dusan Graovac: "A Method for PWM Rectifier Line Side Filter Optimization in Transient and Steady States", *IEEE Transaction on Power Electronics*, ISSN 0885-8993, Vol. 17, No. 3, 2002, pp.342-352, [Online]. Available: DOI: [10.1109/TPEL.2002.1004242](http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2002.1004242).
41. Dušan Graovac, **Vladimir Katic**: "On-Line Control Of Current Source Type Active Rectifier Using Transfer Function Approach", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, ISSN 0278-0046, Vol. 48, No. 3, 2001, pp. 526-553, [Online]. Available: DOI: [10.1109/41.925579](http://dx.doi.org/10.1109/41.925579).
42. Dušan Graovac, **Vladimir Katic**, Alfred Rufer: "Power Quality Compensation Using Universal Power Quality Conditioning System", *IEEE Power Engineering Review*, ISSN 0272-1724, Vol. 20, No. 12, 2000, pp. 58-60, [Online]. Available: DOI: [10.1109/39.890381](http://dx.doi.org/10.1109/39.890381)

Одабрани чланци на енглеском језику у домаћим и регионалним часописима (од 2000. године):

1. Aleksandar M. Stanisavljević, **Vladimir A. Katić**, Boris P. Dumnić, Bane P. Popadić, "A Brief Overview of the Distribution Test Grids with a Distributed Generation Inclusion Case Study", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 15, No. 1, February 2018, pp. 115-129, DOI: <https://doi.org/10.2298/SJEE1801115S>
2. Bane Popadić, **Vladimir Katić**, Boris Dumnić, Dragan Milićević, Zoltan Čorba, "Synchronization Method for Grid Integrated Battery Storage Systems During Asymmetrical Grid Faults", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 14, No. 1, February 2017, pp. 113-131, DOI: 10.2298/SJEE1701113P
3. **Vladimir A. Katić**, Boris Dumnić, Zoltan Čorba, Dragan Milićević, "Electrification of the Vehicle Propulsion System – An Overview", *Facta universitatis – series: Electronics and Energetics*, Vol. 27, No. 2, June 2014, pp. 299-316, DOI: 10.2298/FUEE1402299K
4. Nikola Čelanović, Ivan Čelanović, Stevan Grabić, **Vladimir Katić**, Zoran Ivanović, and Marko Vekić, "Cyber Physical Systems Approach to Power Electronics Education", *Electronics ETF*, Vol. 16, No. 2, December 2012, pp. 125-129, DOI: 10.7251/ELS1216125C
5. Jovan M. Knežević and **Vladimir A. Katić**, "Comparison of Methods for On-Line Harmonic Estimation", *Electronics ETF*, Vol. 16, No. 1, June 2012, pp. 16-21, DOI: 10.7251/ELS1216016K
6. Jordan Shikoski, **Vladimir Katic**, Risto Rechkoski, "New Infratechnologies in the Deregulated Power Sector", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Vol. 11, No. 2, 1-1-2003, pp. 130-141, dostupno na: <https://journals.tubitak.gov.tr/cgi/viewcontent.cgi?article=3669&context=elektrik> [pristupljeno 3. 8. 2026]

Извори података за Извод из Библиографије:

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0138-8807>

COBBIS PLUS, <https://plus.cobiss.net/cobiss/sr/sr/search/cobib?q=Vladimir+Katic>

Research Gate, <https://www.researchgate.net/profile/Vladimir-Katic-3/research>

Публикација „Српски научници у енергетској електроници”, Поглавље: „Квалитет електричне енергије – Међународни симпозијум Енергетска електроника – Допринос професора Владимира Катића”, каталог Галерије науке и технике САНУ број 43, САНУ, 2020, стр. 40-41, Biography and References, линк: <http://esp.etf.rs/cvkatic.pdf>

Припремио:

Др Владимир Шиљкут, дипл. инж. ел.

