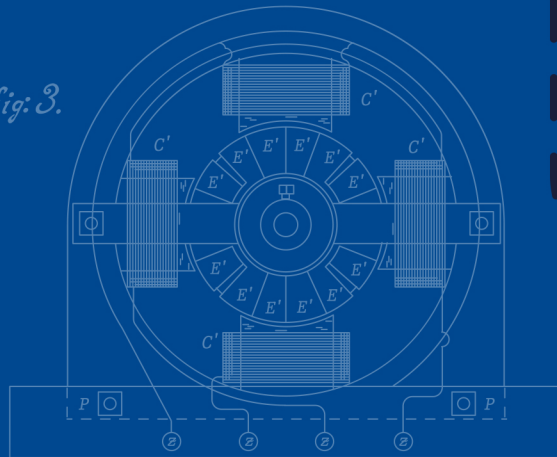


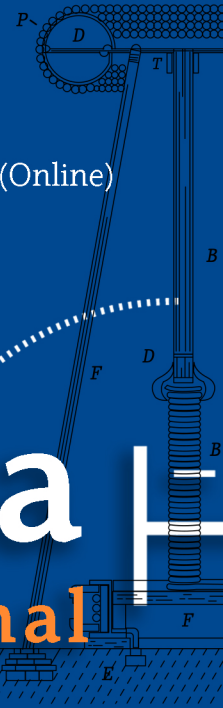


fig. 3.



1.119.732

APPARATUS FOR TRANSMITTING
APPLICATION FILED JAN. 19, 190



ISSN 3009-2892 (Online)

UDK 620.9
621.31

Elektroprivreda

Electric Power Industry Journal

2026

Godina 4, Broj 2
Volume 4, Issue 2

WITNESSES
M. Lawson
Benjamin Miller

SPECIJALNO
IZDANJE





Elektroprivreda

Electric Power Industry Journal



Naučno-stručni časopis Akcionarskog društva „Elektroprivreda Srbije”
u suizdavaštvu sa Elektrotehničkim institutom „Nikola Tesla” Beograd



Godina 4, Broj 2

Sadržaj

Impresum	
Reč Uredništva i gostujućeg urednika	87-88
Članci	
Dušan Joksimović, Đorđe Stojić, Nemanja Milojević, Zoran Ćirić, Slavko Veinović, Luka Ivanović, Ilija Klasnić, Miroslav Pavićević, Dušan Trišić Struktura i dinamičke performanse redundantnih sistema pobude motor-generatora u RHE „Bajina Bašta”	89-108
Jelica Janićijević, Danilo Vlahović, Aleksandar Latinović, Željko Đurišić Idejno rešenje supstitucije uglja kao goriva u blokovima A1 i A2 TE „Nikola Tesla” primenom vodoničnih tehnologija sa obnovljivim izvorima energije	109-125
Nikola Kovačević, Sava Dobričić Napajanje alkalnih elektrolizera dvanaestopulsnim ispravljačima bez interfazne prigušnice	126-135
Miroslav Popović, Aleksandar Milić, Nikola Mirković Modelovanje gubitaka GaN prekidača na osnovu kataloških podataka	136-147
Uroš Njegovan, Zoran Stojanović, Aleksandar Marjanović Ograničenje sklopnih tranzijenata primenom tehnike kontrolisanog uključenja prekidača (Point-on-Wave)	148-161
Marija Đorđević, Srđan Mladenović, Ivana Stamenić, Branko Šumonja Implementacija evropskih procesa u operativni rad EMS AD	162-172

Dodatak – prilozi

Uređivačka politika i tematske oblasti časopisa	173-173
Kategorizacija (rangiranje) rukopisa	174-174
Detaljno uputstvo autorima o načinu pripreme članka	175-179
<i>In memoriam</i> – Prof. dr Vladimir Katić	180-180
Prilog: Izvod iz bibliografije prof. dr Vladimira Katića	181-184

ISSN 3009-2892 = Elektroprivreda (Online)

IZVRŠNI IZDAVAČ

AKCIONARSKO DRUŠTVO „ELEKTROPRIVREDA SRBIJE” BEOGRAD

11 000 Beograd, Balkanska 13

Elektronska prezentacija: www.eps.rs

Telefon Uredništva: +381-11-365-23-63

Imejl: epijournal.editor@eps.rs

Web-platforma Časopisa: <https://epijournal.eps.rs>

SUIZDAVAČ

ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT „NIKOLA TESLA” BEOGRAD

11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a

Elektronska prezentacija: www.ieent.org

Telefon: +381-11-39-52-000

Telefaks: +381-11-36-90-487

ZA IZVRŠNOG IZDAVAČA

Dušan Živković, dipl. inž. el.

Generalni direktor EPS AD

ZA SUIZDAVAČA

Dr Jelena Lukić, dipl. inž. tehn.

Direktorka ETI „Nikola Tesla”

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK

Dr Vladimir M. Šiljkut, dipl. inž. el.

IZDAVAČKI SAVET

Dr Jelena Lukić, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” Beograd

Nebojša Petrović, „Elektromreža Srbije” AD Beograd, predsednik CIGRE Srbija

Vanr. prof. dr Željko Popović, FTN Novi Sad, predstavnik CIRED Srbija

Mr Nenad Šijaković, „Elektromreža Srbije” AD Beograd

Mr Dušan Vukotić, „Elektro distribucija Srbije” DOO Beograd

Prof. dr Vladimir A. Katić, profesor u penziji FTN Novi Sad, predsednik Uređivačkog odbora

Dr Vladimir M. Šiljkut, „Elektroprivreda Srbije” AD Beograd, glavni i odgovorni urednik

UREĐIVAČKI ODBOR

Prof. dr Vladimir A. Katić, profesor u penziji FTN Novi Sad, predsednik

Prof. dr Dragutin D. Salamon, profesor u penziji ETF Beograd, zamenik predsednika

Prof. dr Aleksandar Gajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije (AINS),
profesor u penziji Mašinskog fakulteta Beograd

Prof. dr Jovan Nahman, AINS, profesor u penziji ETF Beograd

Prof. dr Nikola Rajaković, predsednik Saveza energetičara Srbije, profesor u penziji ETF Beograd

Prof. dr Mladen Kezunović, Texas A&M University

Prof. dr Miroslav Begović, Texas A&M University

Prof. dr Jovica Milanović, University of Manchester, School for Electrical Engineering

Prof. dr Vladimir Terzija, Newcastle University

Prof. dr Boris Dumnić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. dr Luka Strezoski, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. dr Dragan Tasić, Elektronski fakultet, Niš

Prof. dr Lidija Korunović, Elektronski fakultet, Niš

Prof. dr Dragana Životić, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Prof. dr Mića Jovanović, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Vanr. prof. dr Tina Dašić, Građevinski fakultet, Beograd

Doc. dr Jelena Ponoćko, Go2Power Consulting i University of Manchester, School for Electrical Engineering

Dr Ana Dajić, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Dr Dragoslav Perić, honorarni konsultant, Beograd

Dr Saša M. Stojković, Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija, Beograd

Dr Jasna Dragosavac, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd

Dr Ninel Čukalevski, Institut „Mihajlo Pupin”, Beograd

Dr Milinko Radosavljević, Rudarski institut, Beograd

Dr Marija Đorđević, „Elektromreža Srbije” AD, Beograd

Dr Jasna Marković Petrović, EPS AD, Beograd

Dr Rada Krgović, EPS AD, Beograd

Dr Vladimir Đorđević, EPS AD, Beograd
Dr Milorad Pantelić, EPS AD, Beograd
Dr Milisav Tomić, EPS AD, Beograd
Mr Dragan Vlasisavljević, nezavisni ekspert za energetiku, Beograd
Mr Aleksandar Jakovljević, EPS AD, Beograd
Mr Nikola Obradović, „Elektromreža Srbije” AD, Beograd
Vladan Ristić, „Elektromreža Srbije” AD, Beograd
Radovan Stanić, EPS AD, Beograd
Biljana Stekić Jovanović, EPS AD, Beograd
Jovan Ilić, EPS AD, Beograd
Milan Đorđević, Center for Energy Excellence, Zrenjanin
Radoš Čabarkapa, Elektroenergetski koordinacioni centar, Beograd
Aleksandar Latinović, Center for Energy Excellence, Zrenjanin
Željko Lazarević, EPS AD, Beograd

GOSTUJUĆI UREĐIVAČKI ODBOR SPECIJALNOG IZDANJA

(Izdanje posvećeno najzapaženijim radovima na 37. savetovanju CIGRE Srbija 2025)

Nebojša Petrović, predsednik CIGRE Srbija i Stručne komisije STK-B2, gostujući glavni urednik
Prof. dr Dragan Petrović, profesor ETF u penziji, gostujući urednik
Prof. dr Dragutin Salamon, profesor ETF u penziji, gostujući urednik
Prof. dr Bogdan Brković, ETF Beograd, gostujući urednik
Prof. dr Tomislav Rajić, ETF Beograd, STK-D1, gostujući urednik
Prof. dr Željko Despotović, Institut „Mihajlo Pupin”, STK-B4, gostujući urednik
Dr Žarko Janda, ETI „Nikola Tesla”, STK-B4, gostujući urednik
Dr Jasmina Grbović Novaković, Institut za nuklearne nauke „Vinča”, gostujuća urednica
Jasna Grujić, Energoprojekt ENTEL, STK-C3, gostujuća urednica
Vladan Cvejić, ENSACO, STK-B5, gostujući urednik
Dejan Stojčevski, SEEPEX, STK-C5, gostujući urednik

TEHNIČKO UREDNIŠTVO

Razvoj, dizajn i uređivanje veb-platforame

Igor Medenica (ED Srbije DOO)
Danilo Mijatović
Radovan Brajović

Lektura i korektura

Milesa Karadžić

Prevodioci

Jasna Đurović
Srđan Bugarić
Ivana Jevtović
Sunčica Đokić Krstić
Ranka Mladenović

Tehnički sekretarijat

Mr Angelina Milovanović
Dejana Kosanović

Časopis „Elektroprivreda” – *Electric Power Industry Journal*
izlazi dvaput godišnje, isključivo u elektronskom obliku,
na <https://epijournal.eps.rs> i tipa je *Open Access*



Sadržaj časopisa dostupan je u otvorenom pristupu, u skladu sa licencom CC BY-NC-ND 4.0:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

COBISS.SR-ID – 121874441

UVODNA REČ UREDNIŠTVA I GOSTUJUĆEG UREDNIKA

Poštovani čitaoci i saradnici,

Pred vama je novi broj časopisa „Elektroprivreda” – *Electric Power Industry Journal*. Kao rezultat nastavka partnerske saradnje časopisa i Nacionalnog komiteta CIGRE Srbija, radi se o još jednom specijalnom izdanju, u kome objavljujemo proširene i unapređene rukopise šest odabranih konferencijskih radova koji su nagrađeni na 37. nacionalnom savetovanju ove organizacije, održanom od 26. do 30. maja 2025. godine, na Zlatiboru. Eminentni stručnjaci iz akademske zajednice i privrede, eksperti u oblastima kojima pripadaju teme ovih radova, članovi su Gostujućeg uređivačkog odbora koji je, u saradnji sa stalnim Uredništvom časopisa, pregledao i recenzirao rukopise ovih članaka i pripremio ovo izdanje.

U prvom članku su prikazani tehničko rešenje, karakteristike i funkcionalnosti novih sistema pobude motor-generatorâ u reverzibilnoj hidroelektrani (RHE) „Bajina Bašta”. Zamena starih sistema pobude obavljena je u sklopu nedavno završene revitalizacije agregatâ u ovoj RHE, ključne aktivnosti za dalje očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sistema Srbije i za integraciju obnovljivih izvora u njega. Novougrađeni, savremeni regulatori pobude omogućavaju potpunu kontrolu agregata u svim pogonskim stanjima, uz visoku pouzdanost, osiguranu redundantnom (1+1) arhitekturom tiristorskih mostova i regulatorskih jedinica. Rad agregatâ je podržan u sva četiri kvadranta pogonskog dijagrama, uz sinhroni start i električno kočenje. Na kraju članka su ilustrativno prikazani i dinamički odzivi, snimljeni prilikom prijemnih ispitivanja agregatâ, na osnovu kojih su evaluirani i verifikovani pokazatelji dinamičkih performansi sistema.

U drugom članku je najpre dat osvrt na ključne tehnološke principe, prednosti i ograničenja savremenih metoda proizvodnje „zelenog” vodonika, sa fokusom na elektrolizu. Prikazani su tehnološki trendovi koji ubrzavaju primenu vodonika u energetskim sistemima. Potom je izložen konkretan predlog praktičnog, zasad samo idejnog, rešenja izgradnje postrojenja za proizvodnju i skladištenje vodonika kao zamenskog goriva, za eventualne, buduće gasne turbine blokova A1 i A2 u termoelektrani „Nikola Tesla”; dakle, na lokalitetu koji već ima obezbeđenu kompletnu infrastrukturu. Analizirani su uslovi za formiranje energetskog kompleksa za proizvodnju, skladištenje i upotrebu vodonika, sagledani su izazovi u vezi s tim i dati predlozi lokacija objekata i opreme za snabdevanje vodom, elektrolizera i sistema za skladištenje vodonika. Stoga ovaj rad nudi konzistentnu analizu jedne od potencijalnih opcija za dekarbonizaciju elektroenergetskog sektora Srbije.

Na tragu razvoja i korišćenja vodoničnih tehnologija, i naredni tekst razmatra problematiku u vezi sa radom elektrolizera. Naime, ovaj članak daje prikaz razvoja i praktične realizacije specifičnih topologija energetskih pretvarača za napajanje alkalnih elektrolizera u svrhu proizvodnje „zelenog” vodonika. Njegova posebna vrednost leži u činjenici da ne prikazuje samo teorijska razmatranja ili simulacione modele, već opisuje kompletno realizovano industrijsko postrojenje snage 40 kW, uspešno pušteno u rad u okviru termoeenergetskog sistema, za potrebe hlađenja generatora. Inovativnost ovog rešenja, inače – ploda rada domaćih stručnjaka, ogleda se u specifičnoj, dvanaestopulsoj topologiji bez interfazne prigušnice između dva tiristorska mosta. Umesto nje, koristi se tronamotajni transformator s amplitudski nejednakim sekundarnim naponima. Tekst članka je bogato ilustrovan dijagramima i eksperimentalnim rezultatima, koji potvrđuju prethodno iznete teorijske postavke.

I sledeći članak je iz oblasti energetske elektronike. On se bavi modelovanjem dinamičkih gubitaka prekidača snage na bazi galijum-nitrida (GaN), savremenog poluprovodnika velikog energetskog procepa, koji se koristi radi postizanja visokih efikasnosti i velike gustine snage. Za razliku od tehničkih rešenja u postojećoj literaturi, predloženi analitički model simultano uzima u obzir nelinearnu zavisnost parazitnih kapacitivnosti (Ciss, Coss, Crss) od napona drejn-sors, kao i nelinearnu zavisnost transkonduktanse (gm) GaN prekidača. Definisan je i primenjen algoritam koji diskretizuje nelinearne krive iz kataloga prekidača, u više od 100 tačaka, čime se izbegavaju analitičke aproksimacije koje unose greške na visokim učestanostima. Ključni inovativni iskorak je detaljna matematička separacija ukupne struje na struju provodnog kanala i na struju parazitnih kapacitivnosti. Ovo razdvajanje omogućava preciznu identifikaciju gubitaka tokom tzv. tvrdih, mekih i polumekih komutacionih procesa u konfiguraciji polumosta. Rad poseduje i visoku praktičnu vrednost, jer je predloženi teorijski model verifikovan korišćenjem fizičkog prototipa sinhronog spuštača napona, snage 1 kW, koji su konstruisali sami autori i sprovedli merenja u celom opsegu njegovog radnog napona.

U pretposlednjem članku je opisana tehnika kontrole trenutka uključivanja prekidača kao mera ograničavanja negativnih uticaja sklopnih tranzijenata. Ovo je veoma aktuelna tema u prenosnim sistemima. Funkcija kontrole prekidača i potencijalni efekti primene u prenosnoj mreži testirani su u laboratorijskim uslovima. Laboratorijska postavka se sastojala od mikroprocesorskog uređaja za zaštitu i upravljanje kao kontrolera i simulatora u realnom vremenu (engl. *Hardware-in-the-Loop*, HIL), na kome je realizovan model paralelne prigušnice 400 kV i prekidača. Predstavljani su efekti sklopnih tranzijenata usled priključenja različitih vrsta opterećenja. Izvršeno je poređenje sa konvencionalnim uključanjem prekidača kompenzacione prigušnice. Laboratorijska verifikacija rezultata dodaje praktičnu vrednost zaključcima iznetim u članku.

Poslednji članak razmatra implementaciju evropskog regulatornog okvira i operativnih praksi u rad operatora prenosnog sistema (OPS) u regionu Zapadnog Balkana. Prikazan je način koordinacije procesa koji se odvijaju na nivou evropskih operatora prenosnih sistema i glavne promene koje se sprovode u operativnom radu domaćeg OPS-a, „Elektromreže Srbije” (EMS AD). Dva najvažnija procesa su koordinisana analiza sigurnosti sistema i proračuni prenosnih kapaciteta i oni se usklađuju sa ENTSO-E. Prikazan je i regulatorni proces priključenja EMS AD evropskim regionima za proračun kapaciteta – CORE i SEE regionu i ukazano je na probleme u vezi s njim. Predstavljani su osnovni koncepti koordinisanih procesa koji će se delom realizovati u okviru OPS-a, a delom kroz regionalne koordinacione centre. Pri tome je neophodno ispuniti pravilo dodele 70% kapaciteta kritičnog elementa, odnosno interkonektivnih dalekovoda i pri upravljanju opterećenjima unutrašnjih dalekovoda koja utiču na interkonekciju, u okviru procesa upravljanja zagušenjima u interkonekciji Jugoistočne Evrope i prenosnoj mreži Srbije. Posebna vrednost ovog članka ogleda se u jasnom prikazu trenutnog stanja u Evropi u odnosu na poziciju i stepen implementacije u Srbiji, kao i u identifikaciji procesa i aktivnosti koje je neophodno realizovati u narednom periodu. Naime, implementacija analiziranih mehanizama predstavlja jedan od ključnih preduslova za integraciju Srbije u jedinstveno evropsko tržište električne energije, uključujući spajanje tržišta dan-unapred i unutar-dnevnog tržišta, kao i za priključenje evropskim balansnim platformama.

Imajući u vidu aktuelnost tema i inovativnost konkretnih rešenja prikazanih u ovim člancima, verujemo da će ovakav sadržaj ovog broja privući vašu pažnju i biti od koristi. Najveći broj članaka je u domenu energetske elektronike, jedne od oblasti kojoj je ogroman doprinos dao nedavno preminuli predsednik stalnog Uređivačkog odbora našeg časopisa, profesor Vladimir Katić. Uz osvrt na njegove impresivne karijeru i doprinos struci i nauci, na kraju ovog izdanja prilažemo Izvod iz njegove obimne bibliografije. Nadamo se da će u Izvodu sabrani naslovi poslužiti ekspertima u oblastima kojima se profesor Katić bavio, za njihova sopstvena istraživanja i doprinose, a time i dodatno uvećati dostupnost i korisnost njegovog naučnog i stručnog opusa.

I ovom prilikom ponavljamo naš ljubazan poziv na aktivno učešće čitalačke publike. Uredništvu možete dostaviti rukopise članaka, ali i diskusija, polemika ili ličnih stavova u vezi sa već objavljenim tekstovima i konkretnim stručnim i naučnim problemima i pitanjima koja su u njima razmatrani. Rado ćemo razmotriti sve materijale koje i ubuduće budemo primali i sagledati mogućnosti za njihovo objavljivanje u nekom od narednih izdanja Časopisa.

U ime Gostujućeg uređivačkog odbora
Specijalnog izdanja Časopisa,



Nebojša Petrović, dipl. inž. el.
Predsednik CIGRE Srbija
Gostujući glavni urednik

U ime Uredništva časopisa,



Dr Vladimir Šiljkut, dipl. inž. el.
Glavni i odgovorni urednik

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



Struktura i dinamičke performanse redundantnih sistema pobude motor-generatora u RHE „Bajina Bašta”

¹ Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija*

² EPS AD, Ogranak Drinsko-Limske HE, HE Bajina Bašta, Srbija

Stručni rad

Ključne poruke

- Revitalizacija agregata u RHE „Bajina Bašta” ključna za stabilnost sistema i integraciju obnovljivih izvora
- Savremeni regulatori pobude omogućavaju potpunu kontrolu agregata u svim pogonskim stanjima uz visoku pouzdanost osiguranu redundantnom (1+1) arhitekturom tiristorskih mostova i regulatorskih jedinica
- Podržan rad agregata u sva četiri kvadranta pogonskog dijagrama uz sinhroni start i električno kočenje

Kratak sadržaj

Protočna hidroelektrana i reverzibilna hidroelektrana (RHE) „Bajina Bašta” u Perućcu predstavljaju najveće hidroenergetske objekte izgrađene na reci Drini. RHE „Bajina Bašta” ima veliki značaj za elektroenergetski sistem Srbije zbog mogućnosti rada u generatorskom i motornom režimu, čime povećava fleksibilnost sistema sa aspekta upravljanja proizvodnjom i potrošnjom. Takođe, zbog svoje mogućnosti da brzo startuje i brzo promeni režim rada iz generatorskog u motorni i obrnuto, ova elektrana može brzo da reaguje na poremećaje u sistemu i zameni bilo koji drugi agregat u sistemu „Elektroprivrede Srbije”. Samim tim, i revitalizacija RHE „Bajina Bašta”, koja treba da produži životni vek agregata za nekoliko decenija, ima veliki značaj za elektroenergetski sistem. Tokom 2024. revitalizovan je prvi agregat, dok je revitalizacija drugog agregata završena 2026. U okviru revitalizacije su zamenjeni i kompletni pobudni sistemi. U okviru energetskog dela sistema pobude ugrađene su kvalitetne komponente: pobudni transformatori, prekidači, tiristorski mostovi, oprema za demagnetizaciju itd. Osnovu upravljačkog dela sistema pobude čine sertifikovani digitalni regulatori pobude u okviru kojih su realizovani sekventni automati za sve režime rada agregata: generatorski režim, motorni režim, sinhroni start i električno kočenje. Regulatori omogućavaju različite režime regulacije: automatska regulacija napona statora, reaktivne snage ili faktora snage uz integrisane limiterske funkcije i stabilizator elektroenergetskog sistema. Pouzdanost sistema dodatno je osigurana redundantnom implementacijom tiristorskih mostova i regulatora pobude u konfiguraciji 1+1. Nakon završene montaže i povezivanja kompletne opreme, sprovedena su detaljna podešavanja i ispitivanja sistema pobude, koja su pokazala dobre performanse sistema. Ovo garantuje pouzdan i stabilan rad agregata u svim predviđenim režimima, uz automatsko ograničenje rada unutar definisanih granica pogonskog dijagrama.

Ključne reči

**Motor-generator, pouzdanost,
revitalizacija, sistem pobude**

Primljeno: 6. april 2026.

Recenzirano: 30. jun 2026.

Izmenjeno: 9. jul 2026.

Odobreno: 14. jul 2026.

* Korespondirajući autor: Dušan Joksimović, telefon: +381 64/82-59-741

Imejl: dusan.joksimovic@ieent.org

Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Sistemi pobude za motor-generatore u RHE 'Bajina Bašta'” (<https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/cigre37-a1-8/>), nagrađenog u Studijskom komitetu STK-A1 Obrtne električne mašine, na 37. Savetovanju CIGRE Srbija, Zlatibor, 26-30. maja 2025.

1. UVOD

Osnovni cilj ovog rada je prikaz načina tehničke realizacije sistema pobude na agregatima reverzibilne hidroelektrane (RHE), kao i analiza njegovih dinamičkih odziva u različitim režimima rada. Posebna pažnja posvećena je strukturi regulacionih petlji, ulozi limitera i njihovoj međusobnoj koordinaciji, kao i uticaju ovih elemenata na stabilnost rada agregata. Analiza je zasnovana na rezultatima ispitivanja i snimljenim odzivima, što omogućava uvid u stvarne dinamičke karakteristike sistema pobude.

RHE „Bajina Bašta” ima značajnu ulogu u elektroenergetskom sistemu Srbije zahvaljujući mogućnosti rada u generatorskom i motornom režimu, čime se povećava fleksibilnost sistema u upravljanju proizvodnjom i potrošnjom električne energije [1], [2]. Periodi manje potrošnje električne energije koriste se za punjenje gornjeg akumulacionog jezera radom elektrane u motornom režimu [3], [4]. Kada se u sistemu javi potreba za dodatnom energijom, agregati prelaze na generatorski režim, pri čemu se potencijalna energija vode koristi za proizvodnju električne energije [1], [5]. Zbog mogućnosti brzog starta i promene režima rada, ovo postrojenje može brzo da reaguje na poremećaje u sistemu i zameni druge agregate unutar sistema doprinoseći balansiranju snage [2], [6].

Reverzibilne elektrane imaju značajnu ulogu u integraciji obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem [7], [8]. Njihova uloga ogleda se u obezbeđivanju proizvodnih kapaciteta i skladištenju energije velikih razmera, što je od posebnog značaja za ublažavanje varijabilnosti snage dobijene iz vetra i sunčevog zračenja [7], [9]. RHE „Bajina Bašta”, puštena u pogon 1982. godine, raspolaže instalisanom snagom od 2 x 300 MW sa faktorom snage 0,95 u generatorskom i 2 x 310 MW u pumpnom režimu [10]. Ovaj vid skladištenja služi kao rezerva za nacionalnu mrežu, naročito u periodima vršne potrošnje ili sušnih intervala [8], [11], omogućava efikasno upravljanje, niže operativne troškove i doprinosi stabilnosti mreže u uslovima povećane zastupljenosti obnovljivih izvora [9], [12].

Upravljanje ovim agregatima zahteva pouzdan sistem pobude čija je osnovna funkcija obezbeđivanje magnetnog fluksa neophodnog za rad sinhronne mašine. Sistem pobude obezbeđuje napajanje pobudnog namotaja rotora regulisanom jednosmernom strujom, čime se kontrolišu napon statora i razmena aktivne i reaktivne snage sa elektroenergetskom mrežom [1], [13]. Takođe, sistem pobude pruža podršku tranzijentnoj stabilnosti brzim odzivom i forsiranjem pobudne struje tokom poremećaja [1], [14].

Proces revitalizacije sistema pobude je obuhvatio implementaciju tehničkih rešenja koja u poređenju sa ranijim sistemom pobude donose nedvosmislene prednosti u pogledu pouzdanosti, energetske efikasnosti i integracije u pogon elektrane. Značajna arhitektonska prednost novog rešenja u odnosu na staro jeste primena potpune 1+1 redundancije, koja obuhvata kako upravljački tako i energetski deo sistema pobude. Ovakva konfiguracija direktno podiže nivo raspoloživosti

agregata, jer omogućava kontinuitet rada i automatski prelazak na rezervne komponente u slučaju unutrašnjih neispravnosti, što kod prethodne pogonske konfiguracije nije bilo izvedeno na ovom nivou. U energetsom smislu, prelazak na novu topologiju uspešno rešava izazove povezane sa raspodelom struja unutar statičkih pretvarača. Konkretno, celokupnu struju pobude u svim režimima rada, uključujući i režim forsiranja pobude, obezbeđuje samo jedan tiristorski most. Ovim pristupom je ostvarena velika prednost u odnosu na stari sistem jer je u potpunosti eliminisana pojava nesimetričnog opterećenja paralelnih tiristora, čime se smanjuju lokalna termička naprezanja, ujednačava degradacija komponenti i produžava radni vek energetskih poluprovodnika. Pored prednosti u primarnim kolima, novi sistem pobude donosi i naprednu informaciono-upravljačku arhitekturu koja predstavlja veliko unapređenje u poređenju sa prethodnim stanjem. Ugrađen je namenski akvizicioni sistem projektovan za kontinualni monitoring, detekciju i analizu pogonskih događaja kako samog sistema pobude tako i celog agregata. Ključna prednost ovog podsistema u odnosu na rešenja iz starog sistema jeste njegova potpuna funkcionalna nezavisnost od rada glavnog regulatora pobude, čime se osigurava da procesi obrade podataka ni na koji način ne ugrožavaju stabilnost primarnih upravljačkih petlji mašine. Sa visokom učestanošću odabiranja, od 5 kHz po kanalu za analogne veličine, ovaj sistem u poređenju sa tehnološkim mogućnostima starog sistema omogućava znatno preciznije registrovanje i vernu rekonstrukciju brzih prelaznih procesa. To olakšava kasniju dijagnostiku kvarova, identifikaciju uzroka poremećaja i detaljnu analizu dinamičkog ponašanja sistema, što je sa prethodnom analognom ili starijom digitalnom opremom bilo izuzetno teško ili neizvodljivo. Konačno, povezivanje novog sistema pobude sa SCADA sistemom elektrane izvedeno je kroz savremeni komunikacioni interfejs koji nudi superiorne mogućnosti povezivanja u odnosu na ranije rešenje. Sa jedne strane, zadržan je određeni broj fizičkih žičanih veza za prenos kontaktnih signala i komandi, čime se obezbeđuje brza i galvanski izolovana razmena vremenski kritičnih informacija. S druge strane, za prenos kompleksnih skupova podataka implementirana je serijska komunikacija zasnovana na standardizovanom protokolu IEC 60870-5-104.

Standardizacija oblasti sistema pobude obuhvaćena je serijama standarda IEEE 421.1 do 6 [14]–[18] i IEC 60034-16.1 do 3 [19], koji definišu terminologiju, metode ispitivanja, zahteve za performanse, pripremu tehničkih specifikacija i modele za analizu sistema.

Visoka pouzdanost sistema pobude na agregatima u Peruću postignuta je ugradnjom visokokvalitetne opreme uz precizno dimenzionisanje i doslednu primenu redundancije u energetsom i upravljačkom delu. Upravljačka struktura se oslanja na digitalne regulatore koji putem kompleksnih sekventnih automata upravljaju specifičnim režimima rada agregata, uključujući sinhroni start i električno kočenje. Kompleksni algoritmi upravljanja i regulacije, uz optimalan izbor parametara, omogućavaju stabilan rad motor-generatora (M-G) u svim dozvoljenim režimima, što potvrđuju dinamički odzivi

snimljeni tokom prijemnih ispitivanja nakon revitalizacije [10].

Prilikom projektovanja sistema primenjene su standardne inženjerske metode i poznate strukture regulacije. Kao dopuna standardnim regulacionim funkcijama, uspešno je implementiran i pušten u rad limiter maksimalne reaktivne snage, koji obezbeđuje siguran rad u okviru dozvoljenih dijagrama opterećenja mašine. Najveći inženjerski izazov predstavljala je realizacija kompleksnih sekventnih stanja za različite režime rada reverzibilnog postrojenja, pri čemu je u sekventni algoritam uspešno integrisan motorni režim rada sa sinhronim startom, što je prikazano u 5. poglavlju. Posebno je zahtevna bila pouzdana implementacija procesa prelaska sa jednog na drugo napajanje na kraju procesa sinhronog starta. Značajan izazov činilo je i uklapanje novog sistema u zahteve SCADA sistema. S obzirom na to da se od nadređenog sistema primaju isključivo pojednostavljeni nalozi (Start, Stop i Električno kočenje), celokupna kompleksna logika sekvencijalnog upravljanja, praćenje stanja i stroga provera uslova za bezbedno izvršenje svake komande morala je biti autonomno i robusno implementirana unutar samih digitalnih regulatora pobude.

Regulatori pobude omogućavaju različite režime regulacije, kao što su regulacija napona statora, reaktivne snage i faktora snage. U režimima regulacije reaktivne snage i faktora snage spoljašnje regulacione petlje zadaju referentnu vrednost unutrašnjoj petlji regulacije napona, koja obezbeđuje brz odziv sistema [1], [14]. Podešavanje PID regulatora ima poseban značaj i vrši se primenom klasičnih i savremenih metoda optimizacije [20], [21].

Pored regulacionih funkcija, sistem sadrži limitere koji sprečavaju rad agregata van dozvoljenih granica pogonskog dijagrama [22]. Limiteri maksimalne pobude i reaktivne snage sprečavaju termičko preopterećenje namotaja rotora i statora, dok V/Hz limiter štiti magnetno kolo motor-generatora i blok-transformatora od prezasićenja [13], [23]. S druge strane, limiter minimalne pobude ograničava rad u potpobuđenoj oblasti pogonskog dijagrama koja bi mogla ugroziti statičku stabilnost [24]. Pri radu ovog limitera naročito je važno razmotriti njegov uticaj na elektromehaničke oscilacije i koordinaciju sa stabilizatorom kako bi se izbegla pojava negativnog prigušenja [25]. Važan aspekt pouzdanog rada je koordinacija limitera sa zaštitnim uređajima. Karakteristike limitera treba da budu precizno podešene tako da reaguju pre delovanja odgovarajućih zaštita, čime se sprečavaju nepotrebni ispadi agregata sa mreže tokom prelaznih pojava i poremećaja u sistemu.

Elektromehaničke oscilacije su prirodne, niskofrekventne oscilacije koje se javljaju u međusobno povezanim elektroenergetskim sistemima zbog dinamičke interakcije između električnih i mehaničkih komponenti. Ove oscilacije utiču na fluktuacije brzine obrtanja rotora sinhronih generatora, protoka električne energije, napona i struja. Tipično imaju frekvenciju od 0,1 do 3 Hz [1], [14]. Nedovoljno prigušenje ovih oscilacija ograničava kapacitet sistema za prenos energije i sposobnost sistema da se oporavi od poremećaja i vrati u stabilno stanje. Slaboprigušene oscilacije u sistemu mogu rasti po amplitudi i na kraju dovesti do kaskadnih ispada, što u

ekstremnim slučajevima može rezultirati široko rasprostranjenim nestankom električne energije. Takođe, dugotrajne slaboprigušene oscilacije mogu prekomerno opteretiti generatore, vodove i drugu opremu, što može dovesti do ubrzanog starenja i povećati rizik od otkaza opreme [14]. Stabilizator elektroenergetskog sistema treba da deluje na prigušenje ovih oscilacija, a njegovi parametri se određuju na osnovu detaljne analize stabilnosti pri malim poremećajima [26]. Adekvatno fazno kompenzovanje unutar stabilizatora osigurava stabilnost u širokom opsegu radnih tačaka i različitih mrežnih konfiguracija [27].

Savremeni elektroenergetski sistemi prolaze kroz strukturnu tranziciju obeleženu povećanjem udela obnovljivih izvora energije, prvenstveno vetroelektrana i fotonaponskih postrojenja. Ova promena u proizvodnom miksu postavlja kompleksne zahteve pred održavanje stabilnosti sistema, naročito u pogledu prigušenja sistemskih oscilacija. Karakteristika ovih izvora je varijabilnost primarnog resursa koja zavisi od trenutnih meteoroloških uslova, što unosi stohastičnost u bilans proizvodnje i potrošnje električne energije i uzrokuje fluktuacije parametara mreže, kao i povećano prisustvo slaboprigušenih elektromehaničkih oscilacija. Za razliku od konvencionalnih sinhronih agregata, obnovljivi izvori se na mrežu povezuju posredstvom energetskih pretvarača i ne poseduju inherentnu rotacionu inerciju. Sa porastom učešća ovakvih izvora, ukupna ekvivalentna inercija elektroenergetskog sistema se smanjuje, što mrežu čini osetljivijom na poremećaje. U ovakvim okolnostima, fiksna podešavanja upravljačkih petlji prethodnog sistema pobude pokazuju jasna tehnička ograničenja, pa spremnost novog sistema za promenu parametara u realnom vremenu i adaptivno upravljanje predstavljaju ključnu funkcionalnu prednost u odnosu na stari sistem. Primenjeno rešenje omogućava stabilno povezivanje sa nadređenim sistemima upravljanja posredstvom zahtevanih komunikacionih protokola, što obezbeđuje dugoročnu operativnu prilagodljivost agregata promenljivim uslovima u mreži, što sa prethodnim sistemom pobude nije bilo izvodljivo.

Pouzdanost i performanse sistema evaluiraju se kroz specifične testove definisane međunarodnim standardima za ispitivanje i specifikaciju pobudnih sistema [15]. Analiza eksperimentalno dobijenih dinamičkih odziva u zatvorenoj petlji pruža uvid u dinamičke performanse i robusnost regulacije [28], dok se usaglašenost sa mrežnim pravilima proverava kroz rigorozne protokole merenja i modelovanja [11], [29].

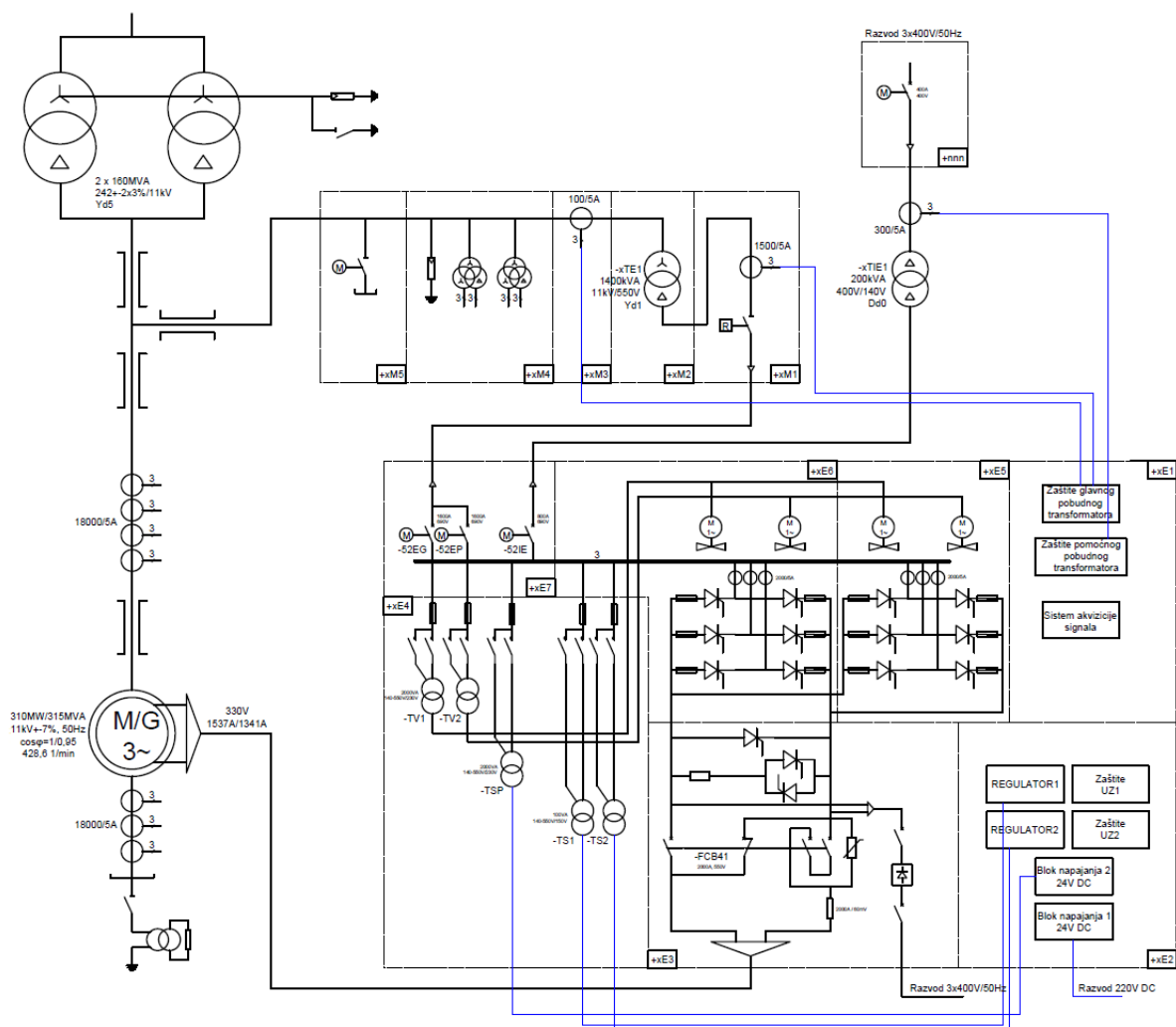
U nastavku rada prikazana je struktura sistema pobude, principi njegove tehničke realizacije i rezultati analize dinamičkih odziva u karakterističnim režimima rada, sa ciljem da se ukaže na uticaj pojedinih elemenata sistema na stabilnost i pouzdanost rada agregata.

2. STRUKTURA SISTEMA POBUDE

Sistemi pobude realizovani su prema strukturnoj šemi na Slici 1 i sastoje se iz energetske i upravljačke sekcije, pri čemu su obe sekcije izvedene redundantno. Osnovu energetske sekcije čine dva punoupravljljiva tiristorska mosta koji vrše regulisano pretvaranje trofaznog naizmeničnog napona u jednosmerni. Redundantnost je ostvarena u konfiguraciji 1+1 ugradnjom dva identična tiristorska mosta koji predstavljaju potpunu rezervu jedan drugom. U ovoj postavci aktivan je jedan tiristorski most preko kog se napaja pobudni namotaj, dok eventualni kvar na njemu inicira automatski prelazak na rezervni most koji preuzima napajanje bez vidljivog uticaja na rad agregata. Takođe, operateru je omogućen prelazak sa mosta na most na osnovu zahteva. Tiristorski mostovi se sa naizmenične strane napajaju sa statorskih izvoda generatora preko glavnog pobudnog transformatora 1TE1/2TE1 (11 kV / 550 V) i prekidača 52EG pri radu agregata u generatorskom režimu, odnosno prekidača 52EP nakon zaletanja pri radu u motornom režimu. Tokom sinhronog starta u motornom režimu i tokom električnog kočenja, tiristorski mostovi se napajaju iz postrojenja sopstvene potrošnje napona 0,4 kV preko transformatora početne pobude TIE1 (380 V / 140 V) i prekidača 52IE. Jednosmerna strana tiristorskih mostova

povezana je na pobudni namotaj generatora preko prekidača FCB41 sa tri radna i jednim mirnim kontaktom, koji uz nelinearni otpornik omogućava brzu demagnetizaciju generatora u havarijskim režimima. Pored navedenog, energetska sekcija obuhvata prenaponsku zaštitu generatora sa antiparalelnim tiristorima i otpornikom, sklop za početno pobuđivanje u generatorskom režimu i RC filtere.

Osnovu upravljačke sekcije čine dva digitalna automatska regulatora pobude zasnovana na savremenoj tehnologiji sa visokim performansama regulacije. Regulatori su identični i međusobno nezavisni, čime je obezbeđena potpuna rezerva u konfiguraciji 1+1. Eventualni kvar na aktivnom regulatoru uzrokuje automatski prelazak na rezervni regulator koji preuzima sve funkcije bez uticaja na rad agregata. Takođe, na nalog operatera omogućen je prelazak sa jednog regulatora na drugi regulator. U okviru upravljačke sekcije realizovane su regulacione funkcije, limiteri, zaštite, redundantnost, upravljanje, merenja, nadzor i komunikacija sa drugim sistemima i uređajima u elektrani. Regulatori upravljaju tiristorskim mostovima pomoću fazne regulacije impulsa za paljenje tiristora, gde ugao paljenja direktno određuje vrednost napona pobude. Jedan regulator može upravljati sa oba tiristorska mosta, pri čemu kombinacija jednog tiristorskog mosta i jednog regulatora obezbeđuje sve



Slika 1. Strukturna šema sistema pobude

predviđene režime rada. Lokalno upravljanje i nadzor vrše se pomoću 17-inčnog ekrana osetljivog na dodir, uz daljinsko upravljanje sa SCADA sistema. Napajanje upravljačke sekcije je redundantno, sa dovodima iz 220 VDC razvoda i invertora elektrane.

Ova sekcija obuhvata i akvizicioni sistem za monitoring pobude, kao i detekciju i analizu poremećaja u radu sistema i čitavog agregata. Akvizicioni sistem nezavisno od regulatora visokom učestanošću prikuplja analogne i digitalne signale. Analogni signali se odabiraju učestanošću od 5 kHz, dok se digitalni skeniraju na svakih 10 ms. U ovaj sistem su uvedeni i interni signali regulatora. Sistem omogućava prikaz trenutnih vrednosti i grafički prikaz vremenske promene svih veličina, uključujući napone i struje statora, napon i struju pobude, snage, brzinu agregata, kao i stanja zaštita i rasklopne opreme. Pri ispunjenju definisanih kriterijuma, sistem automatski snima vremenske promene signala u fajl u određenom trajanju pre i nakon nastanka događaja. Takođe, akvizicioni sistem beleži promene digitalnih signala i formira hronološku listu događaja.

3. OSNOVNI TEHNIČKI PODACI I KARAKTERISTIKE

Sistem pobude ima sledeće osnovne tehničke podatke:

- tip sistema pobude: **statički samopobudni**;
- broj regulatora pobude: **dva redundantna u konfiguraciji 1+1**;
- broj tiristorskih mostova: **dva redundantna u konfiguraciji 1+1**;
- tip tiristorskih mostova: **trofazni punoupravljivi**;
- hlađenje tiristorskih mostova: **redundantno prinudno vazdušno**;
- prenosni odnos glavnog pobudnog transformatora: **11 kV / 550 V**;
- prenosni odnos transformatora početne pobude: **380 V / 140 V**;
- nominalna frekvencija napajanja tiristorskih mostova: **50 Hz**;
- nominalna struja pobude: **1537 A (generator) / 1341 A (motor)**;
- nominalni napon pobude: **330 V**;
- trajno dozvoljena struja pobude: **1691 A**;
- napon pobude pri trajno dozvoljenoj struji pobude: **363 V**;
- plafonska struja pobude: **3074 A**;
- koeficijent forsiranja po struji pobude: **2**;
- dozvoljeno vreme trajanja plafonske struje pobude: **10 s**;
- pozitivan plafonski napon pobude pri nominalnom naponu napajanja: **670 V**;
- negativan plafonski napon pobude pri nominalnom naponu napajanja: **-520 V**;
- koeficijent forsiranja po naponu pobude: **2,03**;
- naponska klasa tiristora: **1800 V**;
- opseg regulacije napona statora: **80-110 %**;
- opseg podešenja kompenzacije pada napona po reaktivnom opterećenju: **±10 %**;
- tačnost regulacije: **±0,5 %**;

- greška regulacije pri promeni temperature ambijenta u opsegu 5-50 °C: **±0,5 %**
- greška regulacije pri promeni frekvencije u opsegu 45 Hz-100 Hz: **±1 %**;
- vreme odziva pobudnog sistema: **20 ms**;
- maksimalno vreme brzog razbuđivanja: **2 s**;
- maksimalni porast napona statora pri naglom rasterećenju pri nominalnoj aktivnoj snazi i $\cos \varphi = 0,95$ uz porast brzine do 155 %: **20 %**.

4. FUNKCIJE SISTEMA POBUDE

Sistemi pobude projektovani su sa funkcionalnostima opisanim u nastavku.

4.1 Energetska i upravljačka redundancija

- Redundantno dvokanalno napajanje pobudnog namotaja motor-generatora pomoću tiristorskih mostova u konfiguraciji 1+1, obezbeđujući potrebnu struju pobude u svim dozvoljenim stacionarnim i prelaznim režimima rada;
- redundantna dvokanalna regulacija pobude realizovana u konfiguraciji 1+1;
- redundantno hlađenje tiristorskih mostova izvedeno u konfiguraciji 1+1;
- automatski prelazak sa jednog na drugi tiristorski most pri kvaru aktivnog mosta ili ručni prelazak na nalog operatera bez značajnijeg uticaja na rad agregata;
- automatski prelazak sa jednog na drugi regulator pri kvaru aktivnog regulatora ili ručni prelazak na nalog operatera bez značajnijeg uticaja na rad agregata;
- automatski prelazak sa jednog na drugi ventilator tiristorskog mosta pri kvaru aktivnog ventilatora ili ručni prelazak na nalog operatera;
- prelazak sa jednog na drugi režim regulacije bez značajnijeg uticaja na rad agregata.

4.2 Režimi regulacije i upravljanja pobudom

- Automatska regulacija napona – regulacija napona statora prema zadatoj referentnoj vrednosti, uz kompenzaciju pada napona na blok-transformatoru po reaktivnoj snazi M-G;
- ručna regulacija – regulacija struje pobude prema zadatoj referentnoj vrednosti;
- automatska regulacija reaktivne snage – regulacija reaktivne snage prema zadatoj referentnoj vrednosti;
- automatska regulacija faktora snage – regulacija faktora snage prema zadatoj referentnoj vrednosti;
- režim direktnog zadavanja ugla paljenja tiristora – mogućnost zadavanja ugla paljenja tiristora kada je aktivan „test” način rada agregata;
- pobuđivanje M-G u automatskoj i ručnoj regulaciji na zadatu vrednost napona praznog hoda u generatorskom režimu rada;
- pobuđivanje M-G tokom sinhronog starta primenom statičkog frekventnog pretvarača ili tokom „Back-to-Back” starta u motornom režimu rada.

4.3 Limiteri i zaštite

- Automatsko ograničenje rada M-G u oblasti dozvoljenih termičkih naprezanja statora i rotora, a u skladu sa pogonskom kartom M-G; ovo je realizovano preko limitera minimalne pobude, limitera maksimalne struje rotora, limitera maksimalne struje statora i limitera maksimalne reaktivne snage;
- vremenski ograničeno forsiranje pobude primenom kombinovane trenutne i inverzne strujno-vremenske karakteristike, aktivno pri velikim poremećajima u elektroenergetskom sistemu;
- sprečavanje magnetskog preopterećenja M-G i blok-transformatora, realizovano preko V/Hz limitera;
- prigušenje elektromehaničkih oscilacija rotora, realizovano preko stabilizatora elektroenergetskog sistema tipa PSS2B.

4.4 Postupci zaustavljanja i havarijsko isključenje

- Razbuđivanje M-G invertovanjem tiristora pri normalnom zaustavljanju;
- gašenje polja M-G u havarijskim režimima pomoću prekidača i otpornika za demagnetizaciju;
- električno kočenje primenljivo pri zaustavljanju agregata;
- zaštita od pojave prenapona u pobudnom kolu, koji mogu nastati usled asinhronog rada M-G na mreži ili pri prekidu strujnog kola pobude.

4.5 Sistem internih zaštita sistema pobude

- Zaštita od otkaza regulacionog kanala;
- kratkospojna zaštita na jednosmernoj strani sistema pobude;
- zemljospojna zaštita pobudnog kola;
- prekostrujna zaštita transformatora;
- kratkospojna zaštita transformatora;
- diferencijalna zaštita transformatora;
- zaštita od preopterećenja rotora sa strujno zavisnom vremenskom karakteristikom;
- zaštita od fazne nesimetrije tiristorskog mosta;
- zaštita od nestanka signala sinhronizacije paljenja tiristora;
- zaštita od nestanka merenja statorskog napona;
- zaštita od nestanka merenja struja pobude;
- zaštita od neuspelog pobuđivanja;
- zaštita od neuspelog razbuđivanja;
- samonadzor upravljačke elektronike.

4.6 Akvizicija podataka, nadzor i komunikacija

- Formiranje hronološke liste događaja;
- snimanje u fajlove signala sa rezolucijom do 5 kHz; snimanje se pokreće pri ispunjenju uslova za trigger, obuhvatajući definisano trajanje pre i nakon nastanka triggera, kao i na direktan nalog operatera;
- lokalno upravljanje i nadzor ostvareni putem ekrana dijagonale 17" osetljivog na dodir, kao i sa prednjih panela regulatora opremljenih displejem, LED diodama i tasterima;

- daljinska komunikacija sa drugim uređajima i sistemima u elektrani, uključujući upravljanje i nadzor posredstvom SCADA sistema.

5. REŽIMI RADA AGREGATA I SEKVENTNA STANJA REGULATORA

Rad regulatora pobude organizovan je kroz sekventna stanja koja predstavljaju delove programskog koda koji postaju aktivni u zavisnosti od režima rada M-G, naloga operatera, signala iz sistema za nadzor i upravljanje, delovanja zaštita i ostalih sistemskih uslova. Svaki tehnološki režim poseduje specifičnu strukturu stanja prikazanu na odgovarajućim dijagramima.

5.1 Generatorski režim

Proces rada sistema pobude kada je agregat u generatorskom režimu obuhvata nekoliko sekventnih stanja opisanih u nastavku:

- **početna faza i priprema:** u početnom stanju impulsi za tiristorske mostove su blokirani; nakon zaletanja agregata do nominalne brzine zadavanjem naloga za start ukoliko su ispunjeni svi uslovi vrši se priprema uključenjem prekidača 52EG i prekidača polja FCB41;
- **pobuđivanje i prazan hod:** kada se ispune uslovi za pobuđivanje, deblokiraju se impulsi; budući da glavni pobudni transformator 1TE1/2TE1 pri razbuđenom stanju M-G nije pod naponom, postupak pobuđivanja počinje uključenjem sklopa početne pobude; tokom postepenog porasta napona statora, napajanje sistema preuzima motor-generator, a regulator održava napon u režimu automatske regulacije;
- **rad na mreži:** nakon sinhronizacije i povezivanja na mrežu, omogućen je izbor između automatske regulacije napona statora, regulacije reaktivne snage ili faktora snage;
- **razbuđivanje i isključenje:** po nalogu za zaustavljanje ili delovanju zaštite se vrši invertovanje tiristorskog mosta radi brzog razbuđivanja; proces se završava isključenjem prekidača 52EG i FCB41.

5.2 Sinhroni start

Tokom procesa sinhronog starta M-G agregat se zaleće od mirovanja do nominalne brzine. Stator M-G se napaja sa startnog agregata u HE tokom „Back-to-Back” sinhronog starta, odnosno sa frekventnog pretvarača u procesu SFP sinhronog starta, dok se rotor napaja konstantnom strujom pobude. Proces rada sistema pobude tokom sinhronog starta obuhvata sekventna stanja opisana kako sledi:

- **priprema i početak zaletanja:** iz početnog stanja u kom su blokirani impulsi, zadavanjem naloga za start ukoliko su ispunjeni svi uslovi za sinhroni start, prelazi se u stanje pripreme; u ovom stanju se uključuju prekidač 52IE i prekidač polja FCB41, čime se uspostavlja napajanje iz razvoda sopstvene potrošnje elektrane preko transformatora TIE1;
- **pobuđivanje:** kada se ispune uslovi za pobuđivanje, deblokiraju se impulsi, agregat se pobuđuje i regulator

održava konstantnu struju pobude tokom celog procesa zaletanja; u ovom stanju aktivna je zaštita od neuspelog sinhronog starta;

- **uspešan start i prelazak:** kada se detektuju uspešan sinhroni start i zaletanje, vrši se uključanje tiristora za prelaz koji prespaja rotor i omogućava bezbednu promenu napajanja sistema pobude; isključenjem prekidača 52IE i uključenjem prekidača 52EP prelazi se na napajanje sistema pobude sa izvoda generatora u motornom režimu rada;
- **razbuđivanje pri prekidu zaletanja:** ako dođe do neuspelog zaletanja ili naloga za prekid, ulazi se u stanje u kome se vrši invertovanje mosta ili brzo razbuđivanje; proces se završava isključenjem prekidača 52IE i FCB41.

5.3 Motorni režim

Nakon uspešnog sinhronog starta, agregat prelazi u motorni režim koji obuhvata faze opisane u nastavku:

- **uspostavljanje samopobude:** agregat je na nominalnoj brzini u praznom hodu, pobuđen je sa statorskih izvoda, pri čemu je aktivna automatska regulacija napona;
- **rad motora na mreži:** nakon sinhronizacije sa mrežom u motornom režimu, prelazi se u stanje u kom su uz automatsku regulaciju napona statora i ručnu regulaciju omogućene i automatska regulacija reaktivne snage i automatska regulacija faktora snage;
- **isključenje iz motornog režima:** po nalogu za razbuđivanje u motornom režimu, vrši se invertovanje tiristorskog mosta ili brzo razbuđivanje; proces se finalizuje isključenjem prekidača 52EP i FCB41.

5.4 Električno kočenje

Sa ciljem efikasnijeg i vremenski kraćeg zaustavljanja, kao i smanjenog intenziteta habanja mehaničkih kočnica, agregati RHE „Bajina Bašta” zaustavljaju se procesom električnog kočenja. Na taj način se produžava vek trajanja mehaničkih kočnica, olakšava njihovo održavanje i izbegava zagađenje usled disipacije materijala kontaktnih obloga mehaničkih kočnica u generatorskom prostoru. Tokom električnog kočenja rotor se napaja konstantnom strujom pobude, dok je namotaj statora u trolnom kratkom spoju koji se formira uključenjem rastavljača za električno kočenje kada brzina agregata padne ispod 50% nominalne vrednosti. Nakon pobuđivanja agregata struje, u namotajima statora stvaraju kočioni moment koji zaustavlja agregat bez upotrebe mehaničkih kočnica.

- **priprema za kočenje:** sekvenca se aktivira kada je agregat u praznom hodu i kada brzina rotora padne ispod 50% nominalne vrednosti; u ovom stanju se vrši zatvaranje rastavljača za električno kočenje, čime se namotaj statora dovodi u trolni kratki spoj, uključuju se prekidač 52IE i prekidač polja FCB41, čime se uspostavlja napajanje iz razvoda sopstvene potrošnje elektrane preko transformatora TIE1;
- **pobuđivanje:** kada se ispune uslovi za pobuđivanje, deblokiraju se impulsi, agregat se pobuđuje i regulator

održava konstantnu struju pobude tokom celog procesa kočenja. U ovom stanju su aktivne zaštite specifične za električno kočenje;

- **završetak kočenja i razbuđivanje:** kada agregat dostigne stanje mirovanja ili vrlo malu brzinu, regulator prelazi u fazu invertovanja tiristorskog mosta radi brzog razbuđivanja; po završetku razbuđivanja, isključuju se prekidač 52IE i prekidač polja FCB41, čime se sistem vraća u početno stanje.

6. REGULACIJA POBUDE

6.1 Automatska regulacija napona statora

Automatska regulacija napona predstavlja osnovni režim regulatora pobude u kom se napon statora održava na referentnoj vrednosti. Strukturna šema sistema za regulaciju pobude kada je aktivna automatska regulacija je prikazana na Slici 2. Automatska regulacija je zasnovana na PI regulatoru (proporcionalno i integralno dejstvo) i ima negativnu povratnu spregu po naponu statora. U cilju kompenzovanja pada napona na blok-transformatoru u regulaciju je uveden statizam po reaktivnoj snazi. Pozitivna vrednost statizma uzrokuje blagi porast napona generatora sa porastom generisane reaktivne snage, čime se obezbeđuje ravnomerna raspodela reaktivne snage između agregata. Limiteri pobude koji imaju za cilj da spreče da se generator nađe van dozvoljene oblasti rada pogonskog dijagrama (slike 3 i 4) deluju preko sumatora automatske regulacije, kao i stabilizator elektroenergetskog sistema koji deluje na prigušenje elektromehaničkih oscilacija agregata.

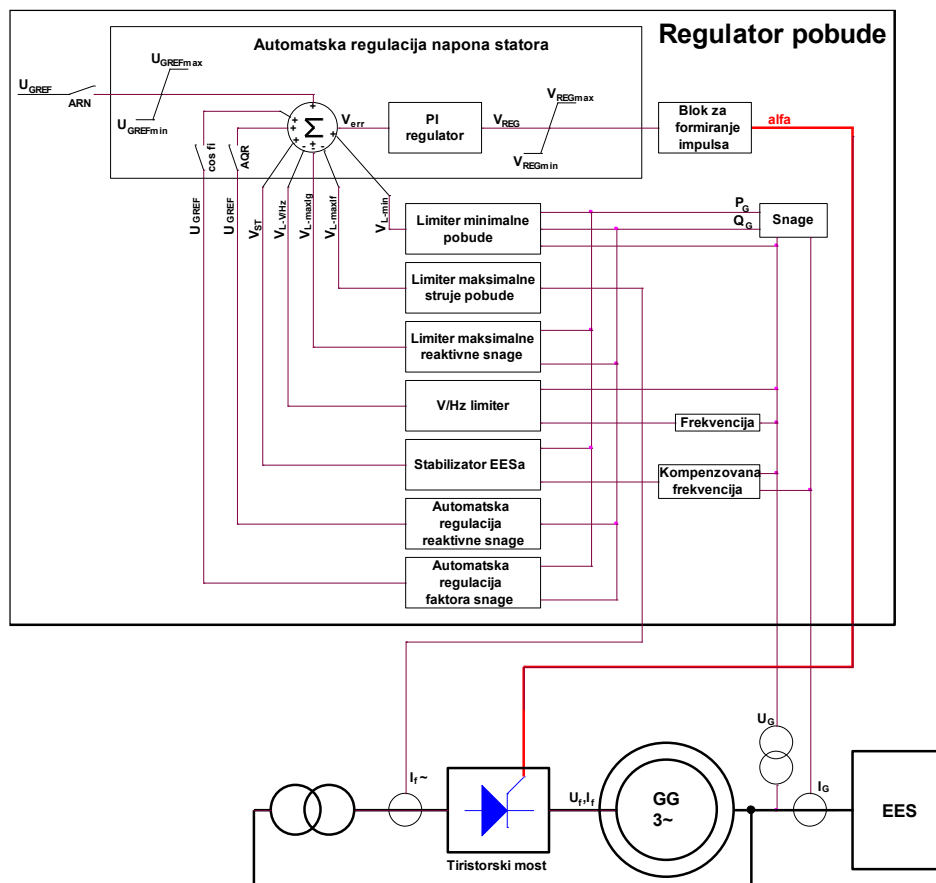
Konačni izlazni signal ARN petlje direktno određuje ugao faznog pomeraja α za paljenje tiristora, čime se precizno kontroliše izlazni napon tiristorskog mosta (napon pobude).

Ovaj režim regulacije se automatski blokira kada je aktivna zaštita od nestanka merenja napona statora i tokom električnog kočenja. Važno je napomenuti da je ARN petlja aktivna i u režimima regulacije reaktivne snage AQR i regulacije faktora snage $\cos \varphi$. U tim slučajevima, ovi režimi deluju kao nadređene regulacije koje automatski menjaju referentnu vrednost ARN regulatora kako bi postigle referentnu vrednost reaktivne snage ili faktora snage zadatu od strane operatera u opsegu definisanom pogonskim dijagramom.

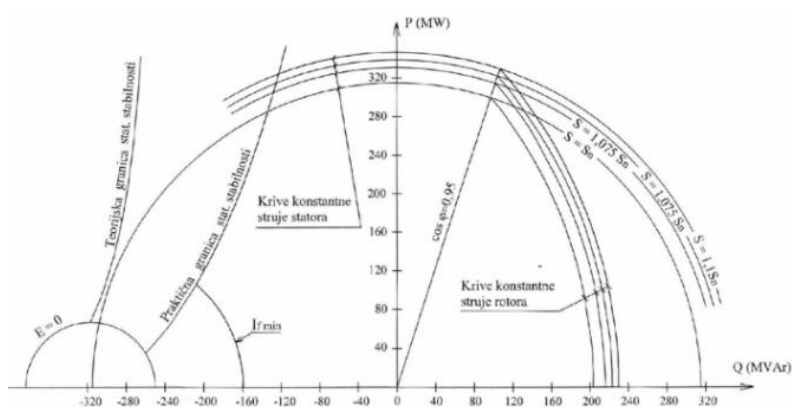
Kada je aktivna ručna regulacija, signal reference stalno prati rad ručne regulacije, čime se obezbeđuje prelaz sa ručne na automatsku regulaciju bez promene u struji pobude i naponu generatora.

6.2 Ručna regulacija struje pobude

Ručna regulacija struje pobude predstavlja rezervni režim rada regulatora pobude pri kojem se struja pobude održava na referentnoj vrednosti. Strukturna šema sistema za regulaciju pobude kada je aktivna ručna regulacija prikazana je na Slici 5.



Slika 2. Strukturna šema sistema za regulaciju pobude kada je aktivna automatska regulacija



Slika 3. Pogonski dijagram agregata

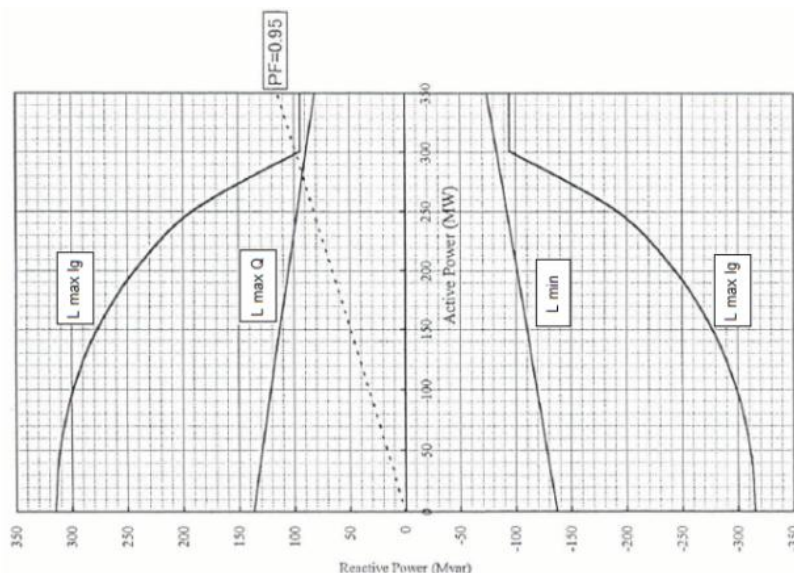
Ručna regulacija je zasnovana na PI regulatoru (proporcionalno i integralno dejstvo) i ima negativnu povratnu spregu po struji pobude. Limiteri pobude koji imaju za cilj da spreče da se generator nađe van dozvoljene oblasti rada pogonskog dijagrama deluju preko sumatora ručne regulacije. Konačni izlazni signal RR petlje direktno određuje ugao faznog pomeraja α za paljenje tiristora, čime se precizno kontroliše izlazni napon tiristorskog mosta (napon pobude).

Zaštita od nestanka merenja struje pobude blokira ovaj režim regulacije. Iz automatske regulacije u ručnu regulaciju se prelazi automatski pri nestanku merenja napona statora, kao i tokom električnog kočenja i sinhronog starta. Kada je aktivna automatska regulacija,

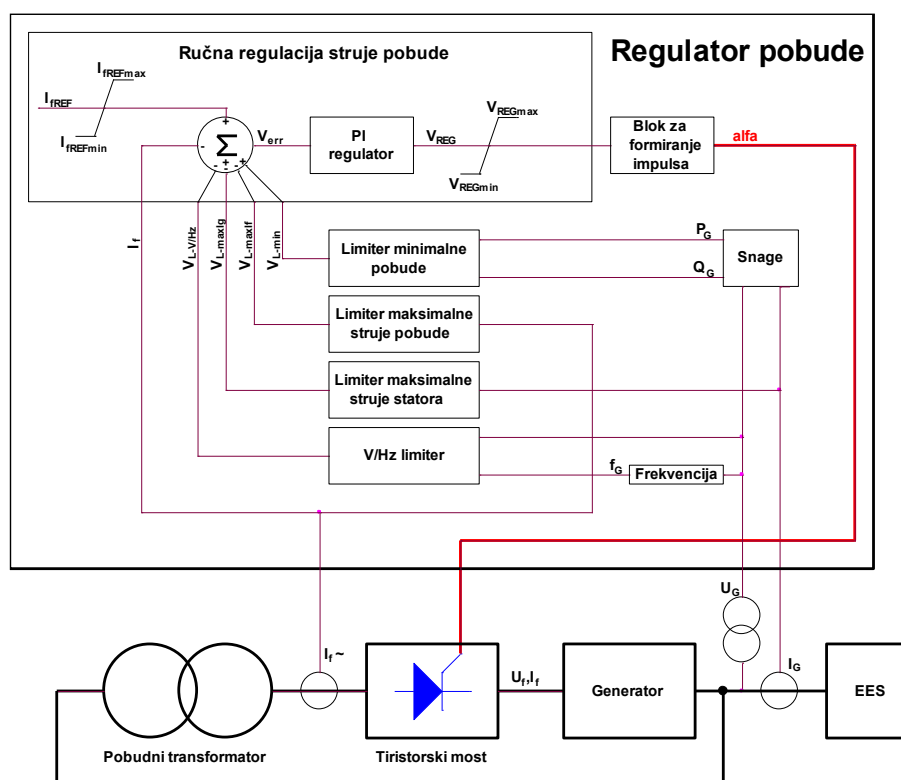
signal reference rezervne regulacije prati rad automatske regulacije, čime se obezbeđuje prelaz na ručnu regulaciju u svakom trenutku bez značajnije promene u struji pobude.

6.3 Automatska regulacija reaktivne snage (AQR)

Automatska regulacija reaktivne snage (AQR) predstavlja režim u kom se reaktivna snaga održava na referentnoj vrednosti. Blok-šema AQR regulacije data je na Slici 6. Regulacija reaktivne snage je zasnovana na PI regulatoru i ima negativnu povratnu spregu po reaktivnoj snazi. Izlazni signal predstavlja referentnu vrednost



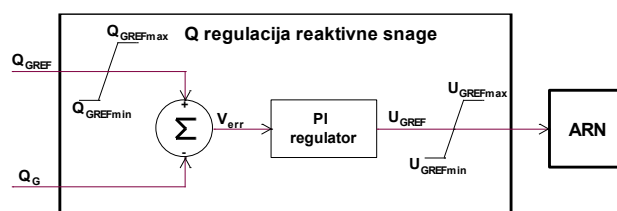
Slika 4. Limiteri pobude



Slika 5. Strukturna šema sistema za regulaciju pobude kada je aktivna ručna regulacija

napona statora, tako da u AQR režimu automatska regulacija napona ostaje i dalje aktivna, ali joj je PI regulator AQR režima nadređen, odnosno zadaje referentnu vrednost. Limiteri pobude i stabilizator elektroenergetskog sistema koji deluju preko sumatora automatske regulacije ostaju aktivni.

Blokada AQR režima je aktivna kada agregat nije na mreži, kada su aktivni limiteri ili kada se napon statora nađe van dozvoljenog opsega.



Slika 6. Blok-šema Q regulacije reaktivne snage

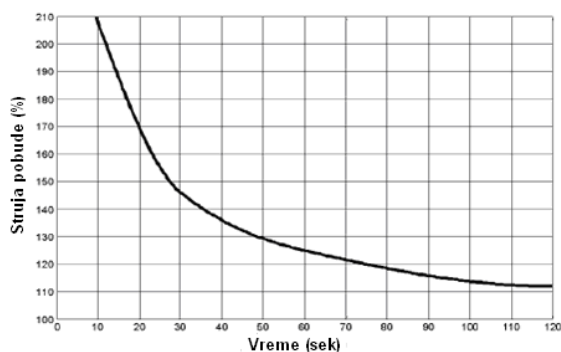
I_{fmax2} predstavlja plafonsku struju pobude. Za pobudnu struju čija je vrednost između I_{fmax1} i I_{fmax2} odrada limitera ima inverznu vremensku karakteristiku koja se podešava parametrima A , B i C , dok za pobudnu struju čija je vrednost veća od I_{fmax2} limiter odrađuje trenutno. Izlazni signal limitera deluje preko sumatora automatske ili ručne regulacije i učestvuje u formiranju signala greške. Dozvoljeno vreme trajanja preopterećenja rotora u zavisnosti od struje pobude je u standardu [18] definisano funkcijom:

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

pri čemu su: I_f – struja pobude u relativnim jedinicama (engl. *per unit*, p. u.); A , B i C – koeficijenti. Najčešće se dozvoljeno preopterećenje rotora modeluje kvadratnom funkcijom ($B = 2$). Primer ove karakteristike je prikazan na grafiku na Slici 10.

6.8 Limiter maksimalne struje statora

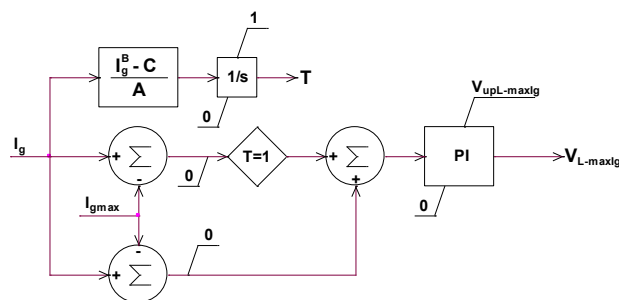
Funkcija limitera maksimalne struje statora je da održi struju statora u granicama dozvoljenog opterećenja, kako bi se sprečila odrada prekostrujne zaštite generatora. Pri pojavi preopterećenja limiter najpre detektuje preopterećenje, dozvoljava trajanje preopterećenja tokom definisanog vremenskog perioda i ukoliko preopterećenje postoji i nakon tog perioda, limiter deluje na smanjenje struje na granicu prorade limitera. Limiter ima inverznu vremensku karakteristiku prorade. Blok-šema limitera je prikazana na Slici 11.



Slika 10. Karakteristika dozvoljenog preopterećenja rotora

Ulazni signal limitera maksimalne struje statora je signal I_g proporcionalan struji statora generatora. Limiter je zasnovan na PI regulatoru. Vrednost prorade I_{gmax} predstavlja trajno dozvoljenu struju statora. Odrada limitera ima inverznu vremensku karakteristiku. Izlazni signal limitera deluje preko sumatora automatske ili ručne regulacije i učestvuje u formiranju signala greške.

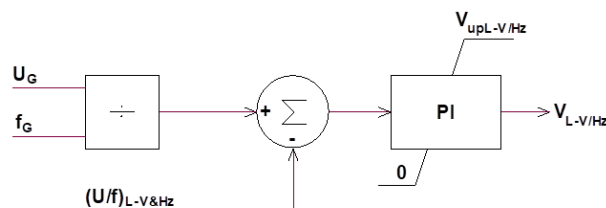
Dozvoljeno vreme trajanja preopterećenja statora u zavisnosti od struje statora može se iskazati sličnom funkcijom kao i kod rotora (Slika 10).



Slika 11. Blok-dijagram limitera maksimalne struje statora

6.9 Limiter V/Hz

Limiter V/Hz služi da zaštiti generator i blok-transformator od prekomernog magnetnog fluksa pri niskoj frekvenciji ili prevelikom naponu. Prekomeran fluks dovodi do pregrevanja i može izazvati oštećenje gvozdenog jezgra blok-transformatora i generatora. Limiter V/Hz uobičajeno se koristi za zaštitu generatora ili blok-transformatora kada je brzina generatora, a samim tim i frekvencija, snižena pri pobuđenoj mašini, na primer pri startu ili zaustavljanju agregata. Blok-šema limitera je prikazana na Slici 12.



Slika 12. Blok-dijagram limitera V/Hz

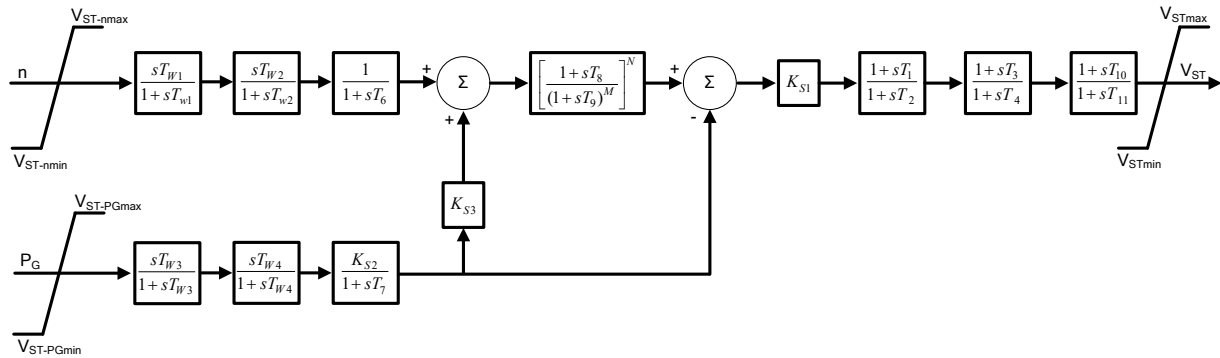
Odnos napona i frekvencije u relativnim jedinicama, naznačen kao odnos V/Hz, merljiva je veličina proporcionalna magnetnom fluksu, zbog čega se kao ulazni signali koriste merenja napona statora i frekvencije. Odnos $(U/f)_{L-V/Hz}$ predstavlja odnos napona i frekvencije pri kom limiter proraduje. Limiter deluje preko sumatora automatske ili ručne regulacije i učestvuje u formiranju signala greške.

6.10 Stabilizator elektroenergetskog sistema

Elektromehaničke oscilacije u elektroenergetskom sistemu predstavljaju pojavu međusobnog oscilovanja rotora sinhronih mašina jednih u odnosu na druge koristeći prenosne vodove za razmenu energije i primetne su u karakterističnim varijablama stanja sinhronih mašina: brzini rotora, frekvenciji, aktivnoj i reaktivnoj snazi, naponu, struji, uglu snage itd. Osnovna funkcija stabilizatora elektroenergetskog sistema je prigušenje elektromehaničkih oscilacija generisanjem pozitivnog prigušnog momenta na vratilu koji je u fazi sa varijacijama brzine. To se postiže delovanjem na pobudni fluks preko dodatnog ulaza u automatsku regulaciju napona statora. Stabilizator treba da deluje samo na oscilacije koje su u opsegu učestanosti od interesa (tipično od 0,2 do 2,5 Hz).

Stabilizator deluje raspirujuće na torzione oscilacije agregata koje predstavljaju oscilacije između rotacionih elemenata agregata: rotori turbinskih sekcija, rotor generatora i rotori budilica (ukoliko postoje) i učestanosti su iznad 2,5 Hz. Zbog toga u okviru stabilizatora mora biti primenjen torzioni filter propusnik niskih učestanosti koji sprečava delovanje stabilizatora na ovaj tip elektromehaničkih oscilacija [15].

Blok-dijagram stabilizatora elektroenergetskog sistema je prikazan na Slici 13 [18]. Princip rada



Slika 13. Blok-dijagram stabilizatora elektroenergetskog sistema

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

Glavna prednost ovog stabilizatora je što nema potrebe za torzionim filterom u glavnom delu stabilizatora (pojačanje stabilizatora i uskladnici za faznu kompenzaciju), tako da torzioni filter ne utiče na signal ΔP_e . S obzirom na to da integral promene mehaničke snage sadrži u sebi i torzione oscilacije i s obzirom na to da su promene mehaničke snage veoma spore, filter propusnik niskih učestanosti se može primeniti na ovaj signal u cilju prigušenja torzionih učestanosti.

Ekvivalentna brzina koja se koristi kao stabilizacioni signal i na koju treba primeniti faznu kompenzaciju dobija se kao integral snage ubrzanja i ne sadrži torzione oscilacije:

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

Ulazni signali stabilizatora su merenje električne aktivne snage P_G i merenje brzine agregata n . Za merenje brzine se koristi filtrirano PLL merenje kompenzovane frekvencije koja je približna brzini agregata. Kompenzovana frekvencija se dobija računanjem frekvencije signala elektromotorne sile

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

gde je X_q sinhrona reaktansa generatora u q-osi.

Stabilizator najpre eliminiše jednosmerne komponente ulaznih signala pomoću filtera jednosmerne komponente (*washout filter*) sa vremenskim konstantama T_{w1} , T_{w2} , T_{w3} i T_{w4} . Ovi filteri isključuju delovanje stabilizatora u ustaljenom stanju i pri promeni mehaničke snage turbine. Parametri T_6 i T_7 predstavljaju vremenske konstante mernih pretvarača. Za dobijanje integrala

stabilizatora se može opisati polazeći od jednačine kretanja rotora:

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

gde su: $\Delta\omega$ – promena kružne učestanosti, H – konstanta inercije agregata, ΔP_m – promena mehaničke snage, ΔP_e – promena električne snage i ΔP_a – promena snage ubrzanja. Mehanička snaga se ne meri direktno, već se integral njene promene računa preko električne snage i brzine na osnovu jednačine:

mehaničke snage parametar K_{S3} treba da ima vrednost 1, a parametar K_{S2} vrednost $T_7/2H$. Parametri T_8 i T_9 predstavljaju parametre torzionog filterapropusnika niskih učestanosti (*ramp-tracking filter*) koji treba da spreči delovanje stabilizatora na torzione oscilacije. Parametri T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_{10} i T_{11} predstavljaju parametre diferencijalnih i integralnih uskladnika (*lead-lag compensator*) pomoću kojih se vrši fazna kompenzacija frekventne karakteristike regulacije pobude kako bi stabilizator generisao pozitivan prigušni moment, koji je u fazi sa varijacijama brzine, u opsegu učestanosti od interesa. Pojačanje stabilizatora od koga zavisi faktor prigušenja elektromehaničkih oscilacija je određeno parametrom K_{S1} . Pri podešavanju vrednost pojačanja treba podesiti na trećinu vrednosti pojačanja pri kom dolazi do nestabilnosti regulacije pobude.

7. DINAMIČKI ODZIVI

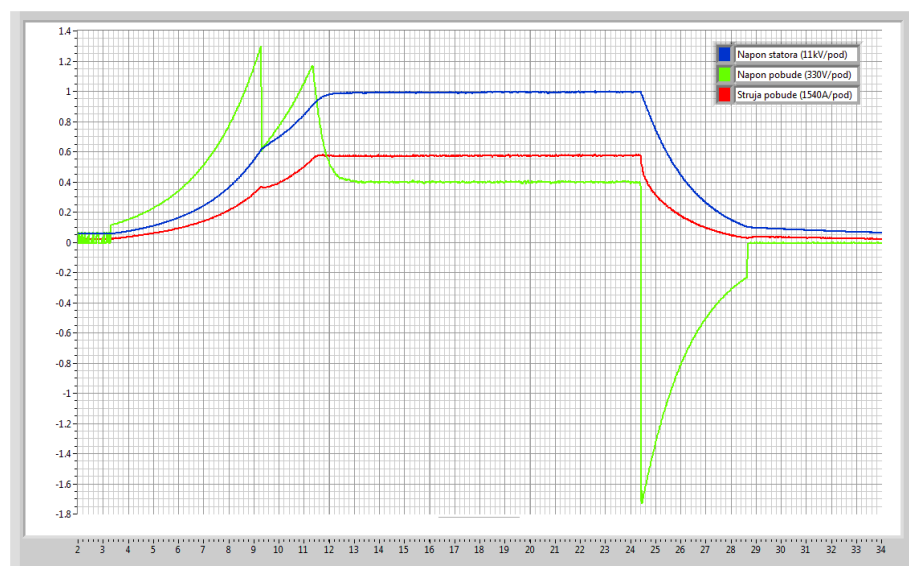
U okviru prijemnih ispitivanja agregata, sprovedena je opsežna analiza rada sistema za regulaciju pobude. U nastavku su prikazani dinamički odzivi snimljeni tokom ovih testiranja, koji su poslužili kao osnova za detaljnu evaluaciju i verifikaciju pokazatelja dinamičkih performansi sistema. Ispitivanja su obuhvatila sledeće radne režime i tranzijentne pojave:

- pobuđivanje i razbuđivanje (Slika 14);
- odziv na odskočnu promene reference automatske regulacije napona (Slika 15);
- električno kočenje (Slika 16);
- sinhroni start (Slika 17);
- odziv na odskočnu promene reference automatske regulacije napona na mreži sa uključenim stabilizatorom (Slika 18);
- odziv na odskočnu promene reference regulacije reaktivne snage (Slika 19);
- aktivacija i odzivi limitera (Slika 20);

- zbacivanje snage agregata (Slika 21).

Detaljnijom analizom eksperimentalnih rezultata potvrđeno je da se pokazatelji kvaliteta dinamičkih odziva nalaze unutar granica propisanih međunarodnim standardima i projektnim zahtevima, uz napomenu da su odzivi na mreži sporiji u odnosu na prazan hod usled znatno manjeg pojačanja ekvivalentne prenosne funkcije motor-generatora i mreže zbog reakcije indukta.

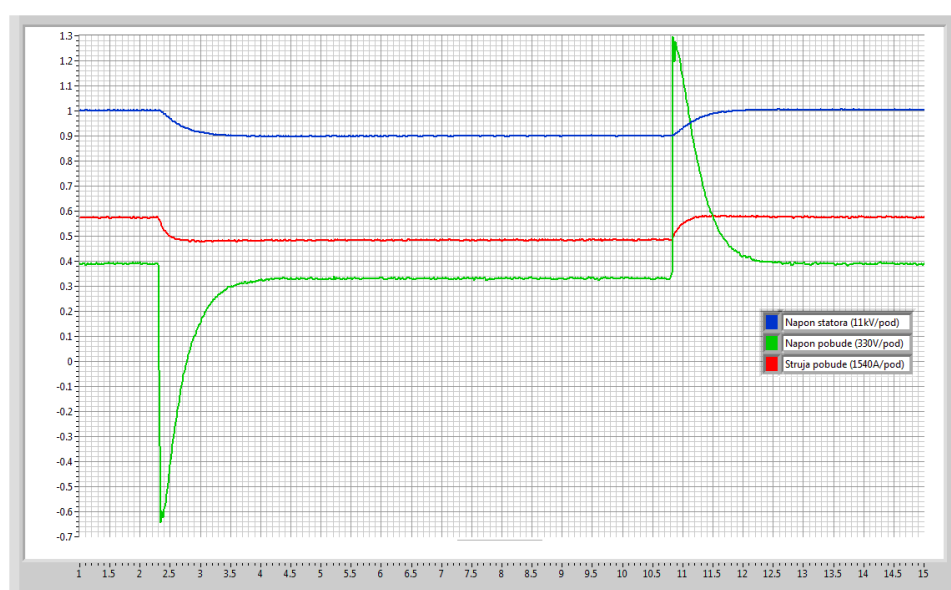
Prihvatljivi opsezi pokazatelja odziva na odskočne promene reference automatske regulacije napona (ARN) definisani su standardom [15], dok su za ostale odzive navedene iskustvene vrednosti iz pogonske prakse. Parametri regulatora su podešeni tako da odzivi budu dovoljno brzi uz efikasnu kompenzaciju fluktuacija u sistemu, a da se pri tome ni na koji način ne ugrozi stabilnost rada.



Slika 14. Pobuđivanje i razbuhivanje u automatskoj regulaciji napona

Tabela I Pokazatelji dinamičkog odziva automatske regulacije napona pri pobuđivanju i razbuhivanju

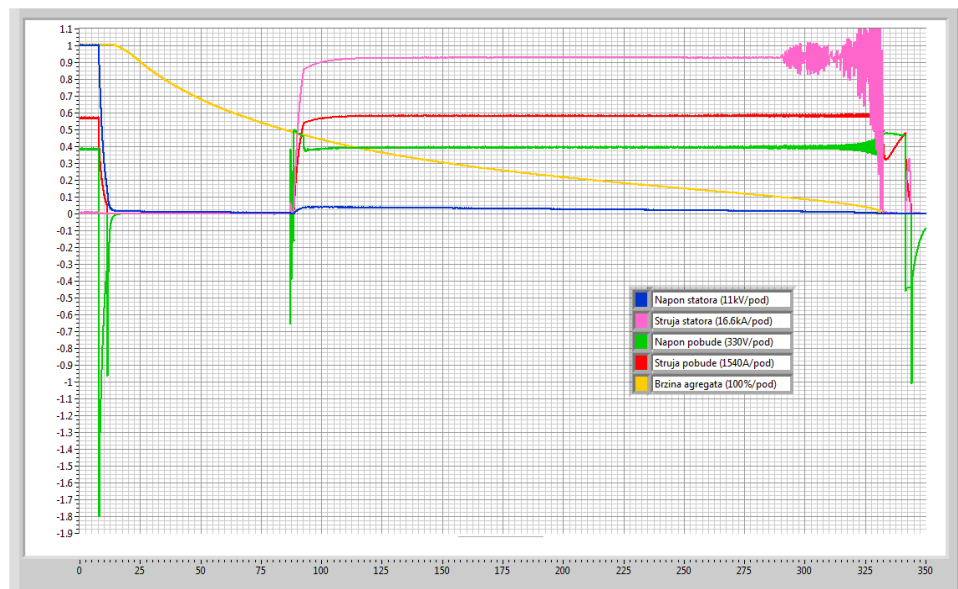
Naziv	Izmereno	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva pri pobuđivanju (s)	6,39	5–10
Vreme smirenja pri pobuđivanju (s)	8,48	8–15
Preskok pri pobuđivanju (%)	0	0–15
Vreme odziva pri razbuhivanju (s)	3,91	2–10
Vreme smirenja pri razbuhivanju (s)	8,38	5–15



Slika 15. Odziv na odskočnu promenu reference od $\pm 10\%$ u praznom hodu – automatska regulacija

Tabela II Pokazatelji dinamičkog odziva automatske regulacije napona na odskočnu promenu reference

Naziv	Izmereno	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva (s)	0,62	0,025–2,5
Vreme smirenja (s)	0,92	0,2–10
Preskok (%)	0	0–15



Slika 16. Električno kočenje agregata

Tabela III Pokazatelji električnog kočenja agregata

Brzina agregata na kojoj startuje električno kočenje (p. u.)	0,50
Struja statora u procesu električnog kočenja (p. u. / kA)	0,93/15,44
Struja pobude u procesu električnog kočenja (p. u. / A)	0,59/908
Brzina agregata pri kojoj se isključuje električno kočenje (p. u. / A)	≈ 0
Vreme trajanja električnog kočenja (s)	249



Slika 17. Sinhroni start agregata sa SFP-om

Tabela IV Poređenje pokazatelja dva načina sinhronog starta agregata

	SFP	Back-to-Back
Struja pobude u procesu sinhronog starta (p. u. / A)	0,55 / 840	0,55/840
Vrednost brzine za aktiviranje signala <i>Sinhroni start uspešan</i> (p. u.)	0,9	0,9
Vrednost napona statora za aktiviranje signala <i>Sinhroni start uspešan</i> (p. u.)	0,9	0,9
Vreme trajanja sinhronog starta (s)	295	210

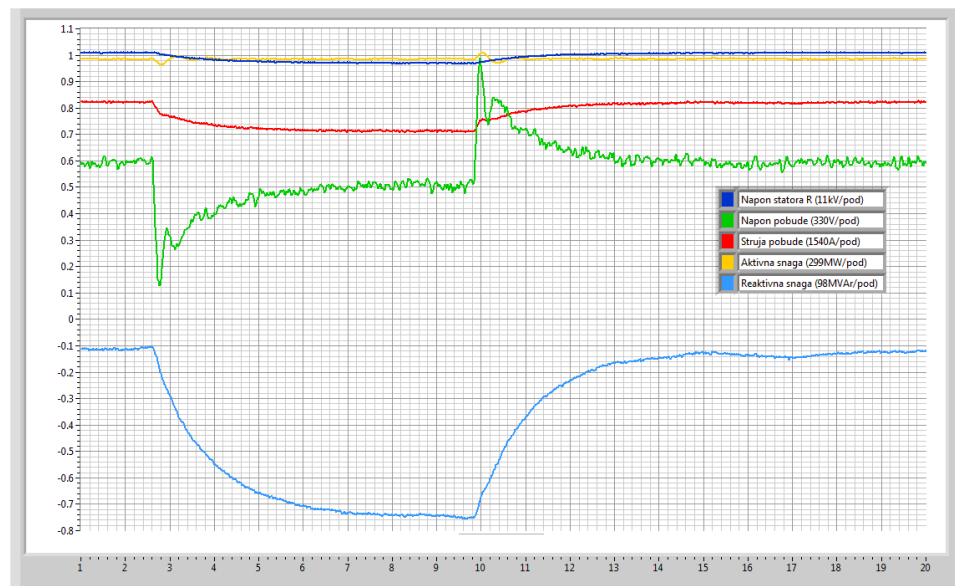
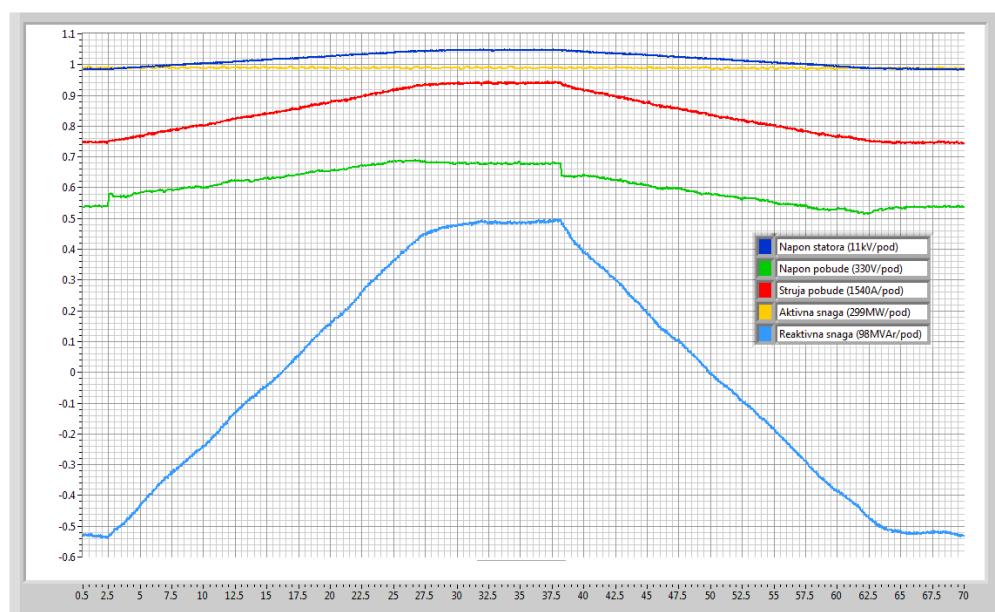
Slika 18. Odstiv na odskočnu promenu reference ARN-a od $\pm 4\%$ sa uključenim stabilizatorom

Tabela V Poređenje pokazatelja dinamičkog odziva sa uključenim i isključenim stabilizatorom

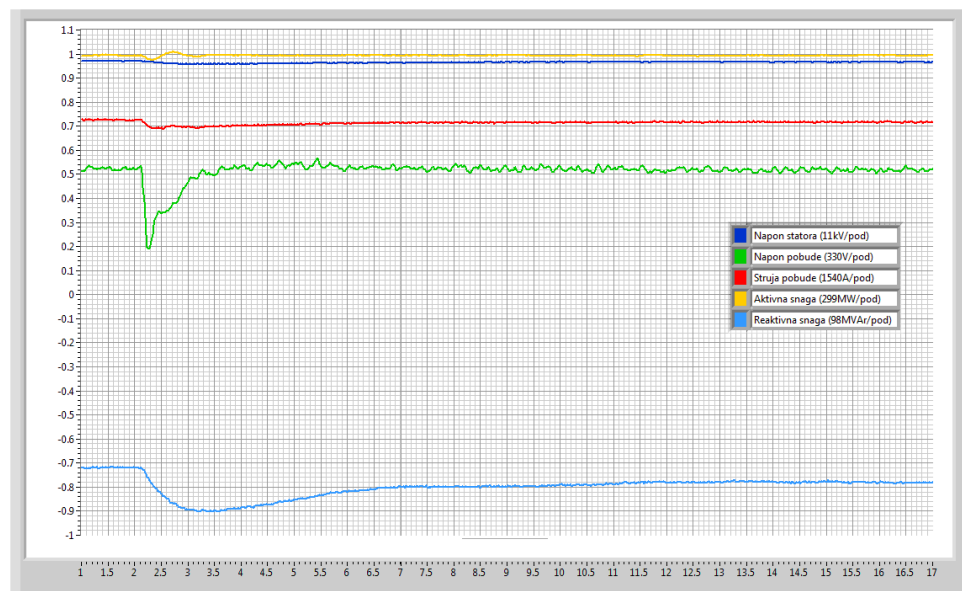
Naziv	Stab. isklj.	Stab. uklj.	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva (s)	1,84	1,85	0,025–2,5
Vreme smirenja (s)	2,76	2,78	0,2–10
Preskok (%)	0	0	0–15
Faktor prigušenja elektromehaničkih oscilacija (%)	10,9	29,4	5–100



Slika 19. Odstiv na odskočnu promenu reference AQR-a

Tabela VI Pokazatelji dinamičkog odziva automatske regulacije reaktivne snage na odskočnu promenu reference

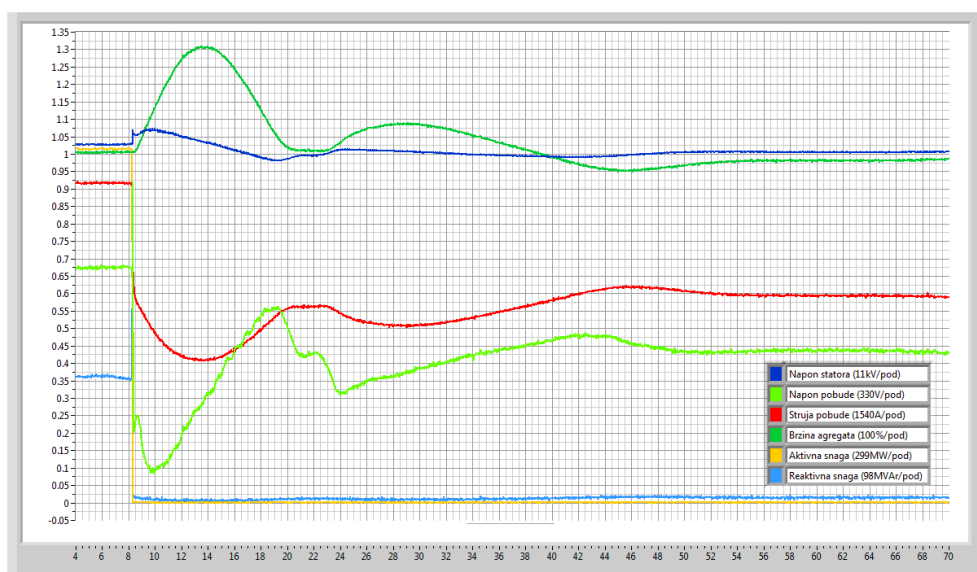
Naziv	Vrednost	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva (s)	21	10–50
Vreme smirenja (s)	27	12–100
Preskok (%)	0	0–15



Slika 20. Odziv limitera minimalne pobude na odskočnu promenu reference ARN-a od -3% sa uključenim stabilizatorom

Tabela VII Pokazatelji dinamičkog odziva limitera minimalne pobude

Naziv	Stab. isklj.	Stab. uklj.	Prihvatljiv opseg
Vreme odziva (s)	3,75	3,71	2–6
Vreme smirenja (s)	4,41	4,34	2,5–10
Preskok (%)	0	0	0–15
Faktor prigušenja elektromehaničkih oscilacija (%)	9,7	23,1	5–100



Slika 21. Odziv pri zbacivanju 100% nominalne snage

Tabela VII Porasti napona statora pri zbacivanju snage

Naziv	75% Pn	100% Pn	Prihvatljiva vrednost
Maksimalna vrednost napona statora (r. j.)	1,05	1,07	1,15

8. ZAKLJUČAK

Revitalizacija agregata predstavlja ključan inženjerski poduhvat za produženje životnog veka ove reverzibilne hidroelektrane narednih nekoliko decenija. Zamena kompletnog sistema pobude omogućava visok nivo fleksibilnosti u upravljanju proizvodnjom i potrošnjom energije, brzo reagovanje na poremećaje u mreži i sigurnu podršku za integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem Srbije.

Ugradnjom kvalitetne opreme uz pravilno dimenzionisanje i primenu redundancije i u energetskom i u upravljačkom delu sistema postignuta je visoka pouzdanost sistema pobude. Kompleksni algoritmi upravljanja i regulacije uz optimalan izbor parametara omogućavaju stabilan rad motor-generatora u svim dozvoljenim stacionarnim i prelaznim režimima rada, što pokazuju eksperimentalno dobijeni dinamički odzivi sistema pobude snimljeni tokom prijemnih ispitivanja agregata. Nova topologija uspešno rešava problem nesimetričnog opterećenja poluprovodnika jer celokupnu struju pobude u svim režimima pokriva samo jedan tiristorski most, čime se smanjuju lokalna termička naprezanja i produžava radni vek opreme.

Unutar regulatora su uspešno i robusno implementirani kompleksni algoritmi koji omogućavaju kompletnu kontrolu i stabilan rad motor-generatora u sva četiri kvadranta pogonskog dijagrama. Sigurnost u radu unutar dozvoljenih termičkih granica garantovana je koordinisanim delovanjem limitera koji reaguju pre zaštitnih uređaja i sprečavaju nepotrebne ispade agregata sa mreže. Implementacija stabilizatora elektroenergetskog sistema tipa PSS2B, koji je zasnovan na integralu snage ubrzanja i opremljen torzionim filterom, omogućava efikasno prigušenje niskofrekventnih elektromehaničkih oscilacija u opsegu od 0,2 do 2,5 Hz.

LITERATURA

- [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. Čirić, N. Milojević, D. Arnautović, Đ. Stojić, M. Milinković, S. Veinović, and D. Petrović, „Parametri pobudnih sistema,” *Elektroprivreda*, vol. 64, no. 3, pp. 198–206, 2011.
- [11] ENTSO-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. Hägglund, *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 Under-excitation 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.

BIOGRAFIJE



Dušan Joksimović je rođen 1982. godine. Diplomirao je 2005. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Odseku za elektroenergetske sisteme, gde je i magistrirao 2013. godine. Trenutno je student doktorskih studija na Fakultetu tehničkih nauka

Univerziteta u Novom Sadu, na Odseku za energetiku, elektroniku i telekomunikacije. U Centru za automatiku i regulaciju Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla” zaposlen je od 2006. godine, gde se trenutno nalazi na poziciji stručnog savetnika. Posедуje bogato iskustvo i ekspertizu u razvoju, projektovanju, proizvodnji i ispitivanju sistema pobude za sinhronu rotacione mašine. Pored toga, poseduje duboko poznavanje procesa razvoja, projektovanja i izrade sistema za akviziciju podataka. Takođe, ima bogato iskustvo u eksperimentalnom određivanju parametara i karakteristika sinhronih generatora.

ORCID: 0000-0001-8070-9412



Đorđe Stojić je rođen u Beogradu, Srbija, 1970. godine. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 1994. godine, gde je takođe magistrirao 1996. i doktorirao 2004. godine u oblasti industrijske elektronike. Od 1994. godine zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola

Tesla” u Beogradu. Njegova istraživačka interesovanja obuhvataju sisteme upravljanja, energetske pretvarače i pogone naizmjeničnih motora.

ORCID: 0000-0002-4716-0488



Nemanja Milojević je rođen 1982. godine u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju Prirodno-matematičkog smera završio je u Mladenovcu. Godine 2005. diplomirao je na energetskom odseku Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Po

završetku studija radio je na poslovima razvoja i projektovanja uljnih i suvih energetskih transformatora u kompaniji „ABS – Minel trafo” u Mladenovcu. Od 2007. godine zaposlen na Elektrotehničkom institutu „Nikola

Tesla” u Beogradu u Centru za automatiku i regulaciju, gde se bavi problemima regulacije i upravljanja u elektroenergetskim sistemima, razvojem, projektovanjem i ispitivanjem pobudnih sistema sinhronih mašina, ispitivanjem električnih mašina, relejnom zaštitom, električnim merenjima i automatizacijom malih elektrana. Od 2024. godine radi na poziciji senior inženjera u Odeljenju istraživanja i razvoja aplikativnih funkcija zaštitnih releja u kompaniji „HITACHI Energy” Švedska.

ORCID: 0009-0005-2806-4641



Zoran Ćirić je diplomirani inženjer elektrotehnike iz Pirota. Rođen je 1950. godine. Završio je Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu. U

prethodnom periodu u Centru za automatiku i regulaciju u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” radio na projektima razvoja, projektovanja, izrade, ugradnje, ispitivanja i puštanja u rad sistema pobuda sinhronih generatora u termoelektranama i hidroelektranama. Kao istraživač je učestvovao na više projekata Ministarstva nauke Republike Srbije koji se u širem smislu tiču oblasti regulacije elektroenergetskih sistema, unapređenja energetske efikasnosti, primene uređaja i tehnologija energetske elektronike itd. U dosadašnjem radu se bavio i problematikom električnih zaštita generatora u termoelektranama i hidroelektranama, kao i problemima vezanim za proces sinhronizacije generatora na elektroenergetsku mrežu. Učestvovao je i bavio se projektima razvoja integrisanih sistema upravljanja radom malih hidroelektrana. Učestvovao je i bavi se ispitivanjima i određivanjem parametara sinhronih generatora. Bavi se projektovanjem i izradom uređaja za akviziciju signala i kontinualni monitoring različitih sistema i postrojenja u okviru energetskih objekata.

ORCID: 0009-0000-5904-8357



Slavko Veinović je rođen u Somboru, Srbija, 1983. godine. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2008. godine, gde je i doktorirao 2025. godine. Zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”

u Beogradu od 2009. godine.

ORCID: 0000-0001-7064-976X



Luka Ivanović je rođen 1997. godine u Valjevu. Osnovne i master studije završio je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na smeru Signali i sistemi, gde je stekao temeljna znanja iz oblasti obrade signala, mašinskog učenja, sistema upravljanja i ugrađenih sistema. Trenutno je na doktorskim studijama iz oblasti upravljanja sistemima i obrade signala. Profesionalnu karijeru započeo je praksom u kompaniji ENEL d. o. o, gde se bavio PLC programiranjem i razvojem modela za obuku. Od februara 2021. godine zaposlen je u Institutu „Nikola Tesla” u Beogradu kao *embedded software* inženjer. U okviru svog delokruga rada učestvuje u razvoju algoritama za sisteme pobuda sinhronih mašina, programiranju mikrokontrolera, industrijskoj komunikaciji i integraciji niskonaponske elektronike za procesnu kontrolu. Pored profesionalnog angažmana, aktivno se bavi naučnim radom, a njegovi istraživački interesi uključuju primenu mašinskog učenja u elektroenergetici, obradu signala i optimizaciju upravljanja elektroenergetskim sistemima. Autor je više naučnih radova, uključujući oblasti modelovanja sinhronih generatora i stabilnosti napona u mikromrežama sa priključenim vetroelektranama.

ORCID: 0000-0003-4345-4523



Ilija Klasnić je rođen 1989. godine. Završio je osnovne studije 2012. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, odsek Energetika, modul Energetski pretvarači i pogoni. Master studije je završio 2013. godine dok je doktorsku disertaciju

pod naslovom „Estimacija i predikcija termičkog stanja rotora hidrogeneratora i uticaj na granične vrednosti reaktivnih snaga” uspešno odbranio 29. 9. 2023. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Od februara 2013. godine zaposlen je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u Beogradu gde je angažovan na poslovima projektovanja, izrade i puštanja u rad sistema pobude sinhronih generatora, primopredajnim i garancijskim ispitivanjima obrtnih električnih mašina, ispitivanjima energetskih pretvarača, konsultantskim

uslugama u oblasti elektroenergetike, termičkom modelovanju sinhronih generatora. Autor je ili koautor nekoliko radova publikovanih u časopisima sa impakt faktorom i prezentovanih na skupovima nacionalnog i međunarodnog značaja. Dobitnik je nagrade za najbolji rad mladog istraživača na sekciji Elektroenergetika 58, konferencije ETRAN. Sekretar je studijskog komiteta STK A1 Obrtne električne mašine u okviru CIGRE Srbija, i redovan je član STK A1 Obrtne električne mašine u okviru međunarodne CIGRE.

ORCID: 0000-0002-7908-9110



Miroslav Pavićević je rođen 1980. godine u Užicu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Energetika, Odseku za elektroenergetske sisteme. Od januara 2006. zaposlen u EPS-u, HE „Bajina Bašta”, gde je prošao sve nivoe od pripravnika do glavnog inženjera. Od 2020. godine radi na poziciji rukovodioca Službe elektroodržavanja. Aktivno učestvovao u revitalizacijama HE i RHE „Bajina Bašta” kao stručni nadzor za sve energetske sekcije. Godine 2011. radio za „Siemens AG Österreich”, kao šef gradilišta i glavni elektroinženjer, na izgradnji RP „Zestafoni” 500 kV u Gruziji. Posедуje značajno iskustvo u projektovanju, ugradnji, ispitivanju i održavanju VN razvodnih postrojenja, sistema relejnih zaštita, pobudnih sistema i hidrogeneratora.

ORCID: 0009-0007-8155-9285



Dušan Trišić je rođen 1963. godine. Diplomirao je 1988. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Odseku za Elektroenergetske sisteme. U EPS-u, HE „Bajina Bašta”, zaposlen je od 1994. godine, gde se trenutno

nalazi na poziciji direktora za proizvodnju energije Ogranka „Drinsko-limske HE”. Poseduje bogato iskustvo u održavanju, ispitivanjima i rekonstrukcijama sistema pobude, sistema turbinske regulacije i sistema numeričkih zaštita za klasične i reverzibilne hidroagregate.

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



Jelica Janićijević¹, Danilo Vlahović¹, Aleksandar Latinović¹, Željko Đurišić¹

Idejno rešenje supstitucije uglja kao goriva u blokovima A1 i A2 TE „Nikola Tesla” primenom vodoničnih tehnologija sa obnovljivim izvorima energije



¹ Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija*

Originalni naučno-istraživački rad

Ključne poruke

- Analizirani su ključni tehnološki principi, ograničenja i prednosti savremenih metoda proizvodnje zelenog vodonika, sa fokusom na elektrolizu
- Sagledani su izazovi i rešenja u skladištenju vodonika
- Prikazani su tehnološki trendovi koji ubrzavaju primenu vodonika u energetskim sistemima: rast kapaciteta elektrolizera, pad troškova i unapređena integracija sa OIE
- Rad ističe značaj optimizacije infrastrukture i razvoja isplativih rešenja kao preduslova za širu upotrebu vodonika u procesu dekarbonizacije

Kratak sadržaj

Integracija obnovljivih izvora energije (OIE) u elektroenergetske sisteme (EES) predstavlja izazov zbog njihovog varijabilnog i neupravljivog karaktera, što otežava bilansiranje proizvodnje i potrošnje. Stabilan rad EES-a zahteva upravljive izvore energije. S druge strane, potiskivanje i gašenje termoelektrana u procesu dekarbonizacije, koja su predviđena integrisanim nacionalnim i klimatskim planom, smanjuje raspoloživu upravljivu energiju što ugrožava uslove bilansiranja i energetske nezavisnosti EES-a. Jedno od rešenja jeste korišćenje viškova energije iz OIE za proizvodnju vodonika i njegovih derivata, koji se mogu skladištiti i koristiti u gasnim elektranama kao upravljiv izvor energije.

U ovom radu analizirani su uslovi formiranja energetskog kompleksa za proizvodnju, skladištenje i upotrebu vodonika na lokaciji postojeće TE „Nikola Tesla A”. Osnovna ideja je da se elektrana u budućnosti ne ugasi, već da pređe sa lignita na obnovljivo gorivo, zamenom konvencionalnih kotlova i parnih turbina gasnoturbinskim postrojenjima prilagođenim sagorevanju vodonika. Na taj način zadržava se ključna infrastruktura, naročito priključno razvodno postrojenje i razvijena interkonektivna veza ovog važnog generatorskog čvorišta.

Analiziran je i potencijal proizvodnje vodonika iz fotonaponskih elektrana koje bi bile izgrađene na prostoru nekadašnjih Kolubarskih kopova. Prikazano je idejno rešenje tehnološke šeme procesa proizvodnje, kompresije, skladištenja i upotrebe vodonika, uz proračun energetske efikasnosti kompletnog sistema. Na osnovu dostupnih podataka izvršena je preliminarne procena očekivane cene proizvedene električne energije.

Koncept podrazumeva da se u periodima niskih tržišnih cena električne energije energija iz fotonaponskih postrojenja ili prenosne mreže usmerava na elektrolizu, dok se proizvedeni vodonik skladišti i koristi u periodima visoke potrošnje i nedostatka energije iz raspoloživih primarnih izvora u sistemu. Dodatno, toplota dobijena tokom elektrolize i sagorevanja vodonika može se koristiti za skladištenje i snabdevanje toplotnog konzuma, čime se povećava ukupna efikasnost sistema.

Ključne reči

Dekarbonizacija, obnovljivi izvori energije, TE „Nikola Tesla”, vodonik

Primljeno: 7. januar 2026.

Recenzirano: 1. juli 2026.

Izmenjeno: 10. juli 2026.

Odobreno: 13. juli 2026.

* Korespondirajući autor: Jelica Janićijević, +381 61/81-51-629

Imejl: jelicajanicijevic616@gmail.com

Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju studentskog rada „*Idejno rešenje dekarbonizacije proizvodnje električne energije u TE 'Nikola Tesla' primenom vodoničnih tehnologija sa obnovljivim izvorima*“ (<https://doi.org/10.5937/cigre37-c3-1/>), nagrađenog u Studijskom komitetu STK-C3 *Održivost EES-a i performanse zaštite životne sredine*, na 37. Savetovanju CIGRE Srbija, Zlatibor. 26-30. maja 2025.

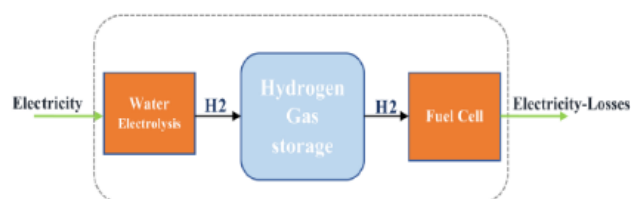
1. UVOD

Problem iscrpljenosti rezervi uglja i njegov sve lošiji kvalitet, kao i starost termoelektrskih blokova u termoelektranama u Srbiji, dovode do problema održivosti proizvodnje električne energije u termoelektranama. Srbija je suočena i sa problemima lokalnog zagađenja vazduha u mnogim gradovima, koje je u određenoj meri u vezi sa proizvodnjom električne energije u termoelektranama, kao i dobijanja toplotne energije u malim ložištima. Osim lokalnih problema, proizvodnja električne energije iz termoelektrana dugoročno nije prihvatljiva i zbog efekata globalnog zagrevanja izazvanog emisijom CO₂, zbog kojeg su termoelektrane suočene sa troškovima karbonskih taksi. S druge strane, elektrifikacija transporta i industrijski razvoj zahtevaju povećanje proizvodnje električne energije.

U takvim uslovima, globalni energetske sektor se suočava sa izazovima dekarbonizacije i prelaska na obnovljive izvore energije, pri čemu vodonik i njegovi derivati postaju obećavajuće tehnologije u procesu tranzicije. Osnovni problem integracije obnovljivih izvora energije u elektroenergetskim sistemima predstavlja problem bilansiranja, odnosno usklađivanje dijagrama proizvodnje iz OIE i zahteva potrošnje. Zbog intermitentnosti i neupravljivosti proizvodnje iz OIE, za stabilan rad EES-a i pouzdano snabdevanje električnom energijom neophodno je obezbediti izvore upravljive proizvodnje. S druge strane, potiskivanje i gašenje termoelektrana u procesu dekarbonizacije smanjuje raspoloživu upravljivu energiju, što ugrožava uslove bilansiranja i energetske nezavisnosti elektroenergetskog sistema.

Vodonik se pojavljuje kao potencijalno rešenje za skladištenje energije proizvedene iz OIE putem elektrolize vode, čime se omogućava kasnija konverzija u električnu energiju sagorevanjem u gasnim turbinama ili gorivnim ćelijama, Slika 1. Upotreba zelenog vodonika u ciklusu „energija u energiju” predstavlja ekološki prihvatljiv način skladištenja energije.

Vodonik se već koristi u različitim sektorima širom sveta kao sredstvo za dekarbonizaciju i skladištenje energije. U energetici, Danska koristi energiju vetra za proizvodnju zelenog vodonika u okviru H2RES projekta. Beč testira upotrebu vodonika u termoelektrani-toplani „Donaustadt” kako bi smanjio emisije CO₂, [2]. U transportu, Nemačka i Japan su razvili vodonične vozove (Alstom Coradia iLint, [3], i Hydrogen Hybrid Train), dok Južna Koreja koristi vodonične autobuse u urbanom prevozu, [4]. Industrijski sektor takođe primenjuje vodonik – „Shell” gradi najveću fabriku zelenog vodonika u Evropi, dok norveška kompanija „Yara” koristi vodonik za proizvodnju amonijaka i njegovo korišćenje umesto prirodnog gasa, [5]. Dubai je razvio postrojenje za proizvodnju vodonika korišćenjem solarne energije, omogućavajući skladištenje viška energije za kasniju upotrebu, [6].



Slika 1. Šema sistema za proizvodnju i skladištenje vodonika i sagorevanja u gorivnim ćelijama, [1]

2. ENERGETSKE KARAKTERISTIKE VODONIKA

Vodonik je otkrio Henri Kavendiš 1766. godine. Vodonik znači stvaralac (gen) vode (hidro); njegovim sagorevanjem oslobađa se samo voda, kao najzastupljenije hemijsko jedinjenje na Zemlji. Vodonik je treći najrasprostranjeniji element na Zemljinoj površini (posle kiseonika i silicijuma). Iako je jedan od najzastupljenijih elemenata, vodonik u molekularnom obliku (H₂) gotovo da i ne postoji slobodan na Zemlji, već se mora izdvajati iz svojih jedinjenja, a pre svega vode, za šta je potrebno ulagati energiju. Iz ovog razloga, vodonik se posmatra kao energetske nosač, odnosno kao skladište energije, jer je za njegovu proizvodnju potrebno uložiti energiju, koja se zatim ponovo može dobiti njegovim sagorevanjem ili direktnom konverzijom u električnu energiju u gorivnim ćelijama. Vodonik ima najveću energetske gustinu po masi od svih konvencionalnih goriva, 1 kg vodonika sadrži otprilike isto energije kao 2,8 kg benzina, [7].

Velika rasprostranjenost u prirodi, energetske vrednost i ekološka prihvatljivost pri njegovom sagorevanju ključni su razlozi zbog kojih se na globalnom nivou i nacionalnim nivoima gotovo svih zemalja razvijaju vodonične strategije, koje sagledavaju potencijal ovog goriva kao glavnog nosioca u procesu energetske tranzicije. Ipak, proizvodnja, skladištenje i upotreba vodonika su povezani sa mnogim izazovima, što je privuklo naučnu zajednicu koja se već decenijama bavi vodonikom kao energetske nosačem. U radu [8] dati su pregled i analiza istraživanja energije vodonika tokom tri decenije (od 1990. do 2023. godine), sa posebnim fokusom na evoluciju tehnologija proizvodnje vodonika iz obnovljivih izvora energije. Cilj studije je da pruži perspektivu o istraživačkim trendovima, tehnološkom napretku i interdisciplinarnoj saradnji, koja je neophodna da bi se performanse vodoničnih sistema razvile do nivoa koji će obezbediti njegovu tehničku i ekonomsku prihvatljivost za široku primenu u praksi, čime bi mogli biti rešeni ključni problemi održivih energetske sistema.

2.1 Energetske gustine vodonika

Energetske gustine vodonika predstavlja ključni faktor u njegovoj primeni kao energetske vektora, naročito kada se poredi sa konvencionalnim fosilnim gorivima. Može se posmatrati kroz dve glavne dimenzije: gravimetrijsku i volumetrijsku energetske gustinu.

Jelica Janičijević i ostali: Idejno rešenje supstitucije uglja kao goriva u blokovima A1 i A2 TE „Nikola Tesla” primenom vodoničnih tehnologija sa obnovljivim izvorima energije

2.1.1 Gravimetrijska energetska gustina (po masi). Vodonik poseduje visoku gravimetrijsku energetsku gustinu koja iznosi oko 142 MJ/kg (HHV – viša toplotna vrednost), što ga u poređenju sa fosilnim gorivima čini superiornim naročito u transportnim sistemima (avionima i automobilima), gde masa goriva definiše mnoge performanse prevoznog sredstva (kao što su efikasnost, ubrzanje i autonomija), [9].

2.1.2 Volumetrijska energetska gustina (HHV po zapremini). Suprotno gravimetrijskoj, vodonik je ograničen relativno niskom volumetrijskom energetskom gustom u poređenju sa većinom konvencionalnih fosilnih goriva. Ovo znači da je za skladištenje iste količine energije potreban znatno veći prostor u poređenju sa drugim gorivima. Specifične vrednosti volumetrijske energetske gustine vodonika i drugih goriva su sledeće, [9]:

- u gasovitom stanju pod standardnim atmosferskim pritiskom, vodonik ima približno 0,012 MJ/L;
- kada se vodonik komprimuje na 700 bara, njegova volumetrijska energetska gustina dostiže 5,6 MJ/L;
- za tečni vodonik volumetrijska energetska gustina iznosi 10,1 MJ/L.

Poređenja radi, konvencionalna goriva imaju znatno veću volumetrijsku energetsku gustinu: kerozin – 36,7 MJ/L; dizel – 34,6 MJ/L; benzin – 34,2 MJ/L, [9].

Amonijak (NH_3) takođe se ističe kao nosilac vodonika sa povoljnom energetskom gustom. Tečni amonijak, pod ambijentalnim pritiskom, ima energetsku gustinu od približno 11,5 MJ/L. Ova vrednost značajno premašuje gasoviti vodonik u standardnim uslovima, pa čak i komprimovani tečni vodonik, što ga čini atraktivnim za dugotrajno skladištenje i transport energije.

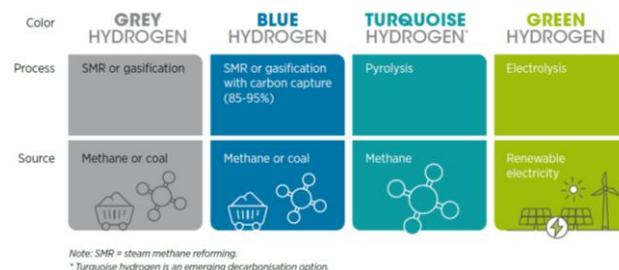
Izazov niske volumetrijske energetske gustine vodonika, posebno u gasovitom stanju, zahteva napredne tehnologije skladištenja, što predstavlja jedan od glavnih izazova za efikasnu primenu vodonika kao nosača energije.

2.2 Podela vodonika na osnovu načina dobijanja

Za izdavanje vodonika iz njegovih hemijskih jedinjenja u prirodi neophodno je utrošiti energiju. Postoji više metoda dobijanja vodonika pri čemu one imaju različit uticaj na životnu sredinu, pre svega u pogledu emisije gasova sa efektom staklene bašte. Podela vodonika po „bojama” sistem je klasifikacije koji se koristi za kategorizaciju vodonika na osnovu njegovog metoda proizvodnje i povezanih emisija gasova staklene bašte (GHG). Ova terminologija pomaže da se razlikuju različiti tipovi vodonika u pogledu njihovog uticaja na životnu sredinu i održivosti u kontekstu globalne energetske tranzicije. Na Slici 2 ilustrovane su osnovne boje u pogledu klasifikacije vodonika na osnovu izvora i metoda primenjenog za njegovo izdavanje. Treba napomenuti da ovo nije unificirana klasifikacija, tako da se u literaturi mogu sresti i druge boje u klasifikaciji vodonika, kao što su crna i braon, ili pink kojom je kategorisan vodonik koji se dobija iz električne energije koja potiče iz nuklearnih elektrana.

2.2.1 Sivi/Crni vodonik (Grey/Black Hydrogen). Ova kategorija se odnosi na vodonik proizveden iz fosilnih goriva, bez hvatanja ugljenika. Na primer, prirodni gas bez

CCUS (*Carbon Capture, Utilization, and Storage*) i ugaljna gasifikacija bez CCUS predstavljaju proizvodne rute sa značajnim emisijama. Ovo se smatra proizvodnjom iz neublaženih fosilnih goriva. Ove metode imaju visok ugljenični otisak i predstavljaju konvencionalne načine proizvodnje vodonika, koje tranzicija nastoji da zameni.



Slika 2. Klasifikacije vodonika na osnovu izvora i metoda primenjenog za njegovo izdavanje, [10]

2.2.2 Plavi vodonik (Blue Hydrogen). Plavi vodonik je vodonik proizveden iz fosilnih goriva (kao što su prirodni gas ili ugalj) u kombinaciji sa tehnologijom hvatanja, korišćenja i skladištenja ugljenika (CCUS). Na primer, proizvodnja vodonika iz reformiranja metana parom (SMR) sa CCUS-om ili ugaljne gasifikacije sa CCUS-om spada u ovu kategoriju. Cilj CCUS-a je smanjenje ugljeničnog otiska vodonika proizvedenog iz fosilnih goriva. Sertifikacije za niskougljenični ili „plavi” vodonik zahtevaju značajno smanjenje emisija GHG-a, često najmanje 30%, a u nekim slučajevima 70% ili 73% manje u poređenju sa proizvodnjom iz fosilnih goriva bez ublažavanja, što se može uzeti kao kvantitativni prag za klasifikaciju vodonika kao plavog, [11].

2.2.3 Tirkizni vodonik (Turquoise Hydrogen). Tirkizni vodonik se proizvodi iz prirodnog gasa kao sirovine. Ključni proces proizvodnje je piroliza metana. Za razliku od tradicionalnih metoda koje koriste fosilna goriva, piroliza metana za proizvodnju tirkiz vodonika ne proizvodi CO_2 emisije. Umesto toga, ugljenik iz metana se pretvara u čvrsti ugljenični pigment (*carbon black*). Čvrsti ugljenični pigment se znatno lakše skladišti nego gasoviti CO_2 .

2.2.4 Zeleni vodonik (Green Hydrogen). Zeleni vodonik se definiše kao vodonik proizveden putem elektrolize vode korišćenjem električne energije generisane iz niskoemisionih izvora, posebno obnovljivih izvora kao što su fotonaponske elektrane i vetroelektrane. Dakle, proizvodnja zelenog vodonika predstavlja rešenje bez emisije CO_2 , pa se iz tog razloga ova kategorija vodonika najviše istražuje u okviru vodoničnih strategija za održivu energetiku.

Iako se proizvodi iz obnovljivih izvora, treba imati u vidu da je potpunu emisiju CO_2 praktično nemoguće izvesti zato što se i za proizvodnju elemenata obnovljivih izvora, iz kojih se proizvodi zeleni vodonik, ipak emituje neka količina CO_2 . Za sertifikaciju zelenog vodonika nisu propisani jedinstveni standardi. Tako, na primer, u Indiji standard za zeleni vodonik zahteva maksimalno emisiju od

2 kg CO₂-eq/kg H₂, dok je u Evropskoj uniji taj standard 3,4 kg CO₂-eq/kg H₂.

2.2.5 Vodonik sa niskim emisijama. Pored kategorizacije po bojama, Međunarodna agencija za energiju (IEA) često u svojim izveštajima koristi širi termin „vodonik sa niskim emisijama” (*Low-Emissions Hydrogen*), koji praktično obuhvata zeleni i plavi. Prema izveštaju [11], vodonik sa niskim emisijama uključuje vodonik proizveden putem elektrolize vode električnom energijom iz niskoemisionih izvora (obnovljivi izvori ili nuklearna energija), kao i vodonik proizveden iz biomase ili fosilnih goriva sa CCUS tehnologijom. Ovaj termin služi kao sveobuhvatna kategorija koja uključuje i zeleni i plavi vodonik, naglašavajući napore za smanjenje emisija gasova staklene bašte u proizvodnji vodonika.

Za kategorizaciju vodonika sa niskom emisijom takođe nisu jedinstveni standardi, tako je, na primer, u Brazilu granica 7 kg CO₂-eq/kg H₂, dok je u SAD ta granica 4 kg CO₂-eq/kg H₂, [11].

Zeleni vodonik je energetska nosač koji se može koristiti u mnogim različitim aplikacijama. Međutim, njegova stvarna upotreba je još uvek veoma ograničena. Današnja proizvodnja vodonika se uglavnom zasniva na prirodnom gasu i uglju, koji zajedno čine 95% proizvodnje. Trenutno ne postoji značajna proizvodnja vodonika iz obnovljivih izvora, ali je ova problematika vrlo zastupljena u naučnim krugovima, kako u pogledu razvoja tehnologija tako i u pogledu integracije vodoničnih sistema u perspektivnim elektroenergetskim sistemima.

3. TEHNOLOŠKI TRENDovi U PROIZVODNJI I SKLADIŠTENJU ZELENOG VODONIKA

Razvoj tehnologija proizvodnje i skladištenja vodonika usmeren je na povećanje efikasnosti i smanjenje troškova procesa, čime se omogućava šira komercijalna primena vodonika kao energetska održivog rešenja. Trenutno se u proizvodnji vodonika primenjuju različite metode, među kojima je elektroliza vode najperspektivnija kada se koristi električna energija iz obnovljivih izvora. Savremene tehnologije elektrolize vode zasnivaju se na pretvaranju električne energije u hemijsku energiju vodonika i kiseonika putem elektrohemijskih reakcija razlaganja vode. U kontekstu velikih energetska sistema i integracije obnovljivih izvora energije, danas se koriste tri glavne tehnološke platforme:

1. Alkalna elektroliza (AEL – *Alkaline Electrolysis*);
2. Protonska membranska elektroliza (PEM – *Proton Exchange Membrane Electrolysis*);
3. Elektroliza sa čvrstim oksidom (SOEC – *Solid Oxide Electrolysis Cell*).

Svaka od ovih tehnologija ima svoje specifične tehničke karakteristike, prednosti i ograničenja, kao i različit nivo tehnološke zrelosti (TRL – *Technology Readiness Level*). Kako je Termoelektrana „Nikola Tesla (TENT) A” proizvodni sistem visokog kapaciteta, od ključnog je značaja razumeti detaljne performanse,

ograničenja i dinamičke karakteristike PEM elektrolize, koja je izabrana za ovo idejno rešenje, [12].

Tabela 1 Uporedne karakteristike AEL, PEM i SOEC tehnologija, [13]

Karakteristika	AEL	PEM	SOEC
Radna temperatura	70–90°C	50–80°C	700–850°C
Radni pritisak	1–30 bar	<30 bar	~1 bar
Efikasnost (LHV)	50–68%	50–68%	75–85%
Pokretanje do nominalne vrednosti	<50min	<20min	>600min
Zrelost tehnologije	Visoka	Visoka	Niska
Investicioni trošak	Najniži	Visok	Najviši
Otpornost na promene snage	Slaba	Odlična	Slaba

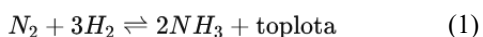
Za potrebe velike varijabilnosti snage i dinamičkog pogona, PEM elektroliza je trenutno jedina tehnologija koja može da prati rad fotonaponske (PV) elektrane i cenovne signale, upravo zbog brzog odziva, širokog radnog opsega i mogućnosti rada pri promenljivom opterećenju [12].

Skladištenje vodonika predstavlja tehnološku prepreku njegovoj integraciji u globalnu ekonomiju. Neophodni su kapaciteti za velike količine vodonika kako bi se skladištila energija u razmerama GWh i TWh. Geološke formacije kao što su rudnici soli, iscrpljena naftna i gasna ležišta nude ogroman potencijal skladištenja kako zbog svojih kapaciteta i sigurnosti tako i zbog ekonomskih i tehničkih faktora [14]. Pored podzemnih sistema, primenjuju se i nadzemna rešenja kao što su rezervoari za komprimovani vodonik pod visokim pritiscima i kriogeni tankovi za tečni vodonik, a u razvoju su i alternativni koncepti poput tečnih organskih nosača vodonika (LOHC – *Liquid Organic Hydrogen Carrier*), koji omogućavaju skladištenje pri umerenim uslovima i korišćenje postojeće infrastrukture [14].

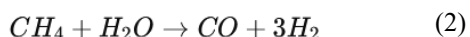
Iako fizičke metode skladištenja vodonika, poput komprimovanog i tečnog vodonika, kao i LOHC sistema, imaju značajnu primenu u kratkoročnom i srednjoročnom balansiranju, za potrebe dugoročnog skladištenja energije sve veću pažnju privlače hemijski nosači vodonika. Među njima se posebno izdvaja amonijak (NH₃), koji zahvaljujući visokoj gustini vodonika, razvijenoj globalnoj logističkoj infrastrukturi i mogućnosti direktnog sagorevanja u gasnim turbinama predstavlja jedno od najperspektivnijih rešenja za sezonsko skladištenje energije i energetska konverziju u postrojenjima velikih snaga [15], [16]. Upravo iz tog razloga, amonijak zauzima značajno mesto u ovom idejnom rešenju kao ključni

element za sezonsko bilansiranje EES-a i dopune kapaciteta vodoničnog goriva.

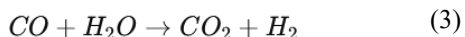
Amonijak, sa 18% vodonika po masi, ima oko 50% veću gustinu vodonika u poređenju sa komprimovanim ili tečnim vodonikom, dok mu je gustina energije skoro tri puta veća. Jedna od ključnih prednosti je postojanje razvijene infrastrukture za proizvodnju, dugoročno skladištenje, transport i distribuciju amonijaka širom sveta [15]. Glavne mane su što je toksičan, može biti opasan pri curenju i što postrojenje za proizvodnju amonijaka dodatno povećava investicione troškove. Njegova proizvodnja se dosad odvijala uglavnom putem Haber–Bošovog procesa, u kome se azot i vodonik kombinuju pri visokim temperaturama i pritiscima, uz katalizatore [16]:



Haber–Bošov proces se oslanja na parno reformisanje metana (SMR – *Steam Methane Reforming*) za dobijanje vodonika:



Nakon toga, ugljen-monoksid se konvertuje u ugljen-dioksid kroz *water-gas shift* reakciju:



Glavni problem klasičnog Haber–Bošovog procesa je visoka emisija ugljen-dioksida, jer je većina amonijaka proizvedena iz prirodnog gasa. Alternativna metoda za smanjenje emisija je dobijanje amonijaka iz zelenog vodonika, dobijenog elektrolizom vode korišćenjem viškova električne energije iz OIE, takozvani zeleni amonijak, što će se i koristiti u ovom idejnom rešenju [16]. Takođe, moguća je direktna elektrohemijaska sinteza amonijaka, korišćenjem električne energije za kombinovanje azota i vodonika u amonijak, čime će se smanjiti potreba za visokim pritiskom i temperaturama. Elektrohemijaska sinteza amonijaka je još u ranoj fazi istraživanja i razvoja i još uvek nije dostigla tehnološku zrelost, ali bi ona potencijalno mogla imati nižu potrošnju energije u poređenju sa konvencionalnim Haber–Bošovim procesom [16]. Predviđa se da će zeleni amonijak do 2035. godine biti ekonomski isplativiji u odnosu na fosilna goriva. Ukupna energetska efikasnost ciklusa proizvodnje i sagorevanja amonijaka kreće se približno između 30% i 48%. Sagorevanjem amonijaka u elektranama može se dostići uporediva efikasnost kao i pri konvencionalnim termoelektroenergetskim procesima, što ukazuje na njegov potencijal kao goriva bez ugljenika [17].

Pored komprimovanog i tečnog vodonika, LOHC sistema i amonijaka, potrebno je pomenuti i skladištenje vodonika u čvrstom stanju, odnosno *solid-state hydrogen storage*. Ovaj pristup zasniva se na vezivanju vodonika unutar čvrstih materijala, najčešće metalnih hidrida, kao što su MgH_2 , $LaNi_5H_6$, $TiFe$ -hidridi i visokoentropijske legure [18]. Glavna prednost ovih sistema je veća bezbednost, jer se vodonik ne skladišti kao slobodan gas

pod visokim pritiskom, već je vezan u strukturi materijala, čime se smanjuje rizik od curenja i eksplozije. Ipak, zbog veće mase materijala, potrebe za upravljanjem temperaturom, sporije kinetike i viših troškova, ova tehnologija se u ovom radu ne razmatra kao osnovno rešenje za velika sezonska skladišta, već kao perspektivna opcija za buduću primenu [18].

Gasnoturbinske tehnologije prilagođene sagorevanju vodonika sve više dobijaju na značaju. Moderne komercijalne gasne turbine već sada mogu koristiti mešavine vodonika i prirodnog gasa, dok su u razvoju i potpuno vodonične turbine [19]. Njihova primena u termoelektroenergetskim postrojenjima poput TENT-a A omogućila bi značajno smanjenje emisija CO_2 uz očuvanje postojećih elektroenergetskih kapaciteta i infrastrukture.

Uprkos značajnim tehnološkim naprecima, ključni izazovi i dalje obuhvataju smanjenje troškova opreme, povećanje efikasnosti proizvodnje i skladištenja, kao i razvoj infrastrukture za transport i distribuciju vodonika, što otvara pitanje njegove integracije u postojeće termoelektroenergetske sisteme, koje će biti analizirano u nastavku rada.

4. IDEJNO REŠENJE ENERGETSKOG KOMPLEKSA

U cilju prelaska na ekološko prihvatljivu proizvodnju energije u procesu dekarbonizacije neophodno je okrenuti se obnovljivim izvorima energije. Kako je TENT važno proizvodno čvorište EES-a Srbije, u cilju očuvanja već postojeće centralizovane infrastrukture predloženo je idejno rešenje postavljanja solarne elektrane u neposrednoj blizini TENT-a, koja bi potpomogla supstituciju uglja zelenim vodoničnim gorivom. Početna faza podrazumeva implementaciju ove promene na blokovima A1 i A2, čime se započinje prelaz na ekološki prihvatljivije izvore energije. Osnovna ideja je da se proizvodnja iz ova dva najstarija termoagregata nadomesti iz fotonaponske elektrane i gasnoturbinskog postrojenja na vodonična goriva, ali da se održi upravljivost proizvodnje i unapredi fleksibilnost sistema.

Niska gustina snage solarnog zračenja na površini Zemlje zahteva pokrivanje velikih površina solarnim panelima. Kako bi se smanjili negativni uticaji na životnu sredinu, ove elektrane je potrebno graditi na devastiranim zemljištima. U tom kontekstu, termoelektrane, koje su tokom decenija eksploatacije uglja stvorile prostrane neplodne površine usled iskopa i odlaganja jalovine i pepela, predstavljaju pogodne lokacije za instalaciju solarnih panela.

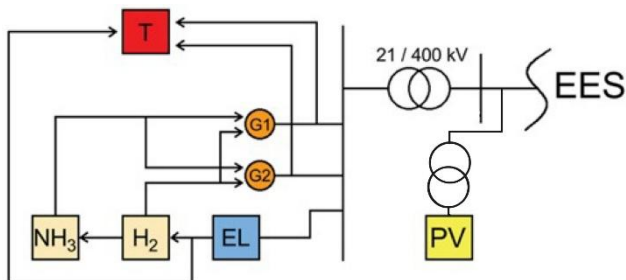
Planirani koncept predviđa izgradnju fotonaponskih elektrana na ovim degradiranim područjima, na delovima Kolubarskih kopova, dok bi u okviru postojećih termoelektroenergetskih kompleksa bili postavljeni kapaciteti za proizvodnju i skladištenje vodonika i amonijaka. Takođe, veoma bitna činjenica i prednost za proizvodnju vodonika je to da imamo već razvijen sistem dopremanja vode iz reke Save, što nam u startu smanjuje troškove i omogućava

iskorišćenje postojeće infrastrukture. Umesto kotlovskih sistema i parnih turbina, nova elektrana bi koristila gasnoturbinske sisteme koji bi sagorevali vodonik i amonijak, čime bi se omogućilo očuvanje postojeće infrastrukture (priključnih i razvodnih postrojenja u termoelektrani), kako bi se zadržali i postojeći energetski tokovi u prenosnoj mreži.

Solarna elektrana bi imala dvostruku funkciju – direktno injektiranje proizvedene snage u mrežu 400 kV u blizini postojećeg priključnog čvorišta TENT-a (PRP „Mladost”), kao i snabdevanje energijom sistema za proizvodnju vodonika. Kapacitet skladištenja vodonika bio bi dizajniran za balansiranje dnevnih i nedeljnih varijacija u proizvodnji i potrošnji energije. Deo vodonika koristio bi se za sintezu amonijaka, koji bi zbog svojih boljih skladišnih karakteristika predstavljao dugoročno skladište energije. Predloženi koncept je ilustrovan na Slici 3.

4.1 Predlog izgradnje fotonaponske elektrane na degradiranom zemljištu ugljenokopa „Kolubara”

Radi iskorišćenja devastiranog zemljišta, fotonaponska elektrana bi se gradila na površinama Kolubarskih kopova. Korišćenje ovakvih lokacija predstavlja optimalno rešenje jer ne dolazi do zauzimanja poljoprivrednog ili infrastrukturno vrednog zemljišta, izbegavaju se troškovi eksproprijacije, a projekat ostvaruje veću ekološku i društvenu prihvatljivost.



Slika 3. Šematski prikaz funkcionisanja energetskog proizvodnog kompleksa na bazi fotonaponske elektrane i zelenih vodoničnih goriva

Kompleks Kolubarskih kopova zauzima nekoliko hiljada hektara zemljišta koje je zbog iskopavanja uglja i odlaganja jalovine postalo neplodno ili je niske poljoprivredne vrednosti. U budućnosti bi ovo neplodno zemljište moglo biti iskorišćeno za izgradnju velikih fotonaponskih elektrana. U predloženom rešenju podrazumeva se fazni prelazak TENT-a na vodonična goriva i postepeno smanjenje proizvodnje uglja, tako da je u početnim fazama potrebno voditi računa da izgradnja fotonaponskih elektrana ne remeti postojeću i planiranu proizvodnju uglja. Trenutno raspoloživa površina, prikazana u Prilogu 1 na Slici A.1, iznosi približno 1000 ha, što je više nego dovoljno za izgradnju predviđene fotonaponske elektrane koja bi bila izgrađena u predloženoj fazi dekarbonizacije proizvodnje u postojećim

blokovima A1 i A2. Pre početka radova biće potrebno izvršiti nivelaciju terena i pripremu površine radi postavljanja fotonaponskih panela i nosećih konstrukcija.

Planirana fotonaponska elektrana podrazumeva ukupnu instalisanu snagu od 500 MWp. Paneli bi bili postavljeni na zemlji, način konstrukcije „šator”, kao krov na dve vode orijentisane istok–zapad, a pravac pružanja redova panela sever–jug. Nagib panela ka istoku i zapadu bio bi 15 stepeni u odnosu na zemlju. Proračuni izvedeni korišćenjem PVGIS alata pokazuju da fotonaponsko postrojenje instalisane snage 1 MWp, sa navedenom konfiguracijom panela, može ostvariti prosečnu godišnju proizvodnju od oko 1044 MWh. Na osnovu toga, planirana elektrana, snage 500 MWp, ostvarivala bi približno 522 GWh godišnje proizvodnje. Ovakva formacija panela predstavlja dobro rešenje u pogledu investicionih troškova, instalacije i zauzimanja prostora. Takođe, vremenski profil proizvodnje ovakve elektrane je povoljniji u odnosu na južno orijentisane panele. Lokacije perspektivne fotonaponske elektrane su udaljene oko 25 km od TENT-a A, a njeno priključenje bi moglo biti realizovano izgradnjom priključne transformatorske stanice i priključenjem po principu ulaz–izlaz na postojeći dalekovod 400 kV br. 436, čija se trasa nalazi u neposrednoj blizini kopova, a koji bi direktno povezivao perspektivnu solarnu elektranu sa priključnim postrojenjem TENT-a A.

4.2 Razvoj sistema za proizvodnju i lokalno skladištenje zelenog vodonika direktno na lokaciji TENT A

Tehnologija koja bi omogućila proizvodnju zelenog vodonika, PEM elektrolizom, procenjenom kao najbolje rešenje, obuhvata različite procese organizovane u jedinstveni sistem, koji bi bili usmereni ka elektrolizeru kao glavnom elementu ovakvog postrojenja. Procese možemo kategorizovati na sledeći način:

- snabdevanje vodom;
- elektrolizer;
- sistem za skladištenje vodonika.

4.2.1 Snabdevanje vodom. TENT A raspolaže dostupnim vodenim resursom iz reke Save, što omogućava efikasno i stabilno snabdevanje vodom za potrebe elektrolize, pri čemu je specifična potrošnja vode za PEM elektrolizu teorijski oko 9 l/kg proizvedenog vodonika, dok u realnim uslovima rada, usled tehnoloških gubitaka i pomoćnih procesa, iznosi približno 11–14 l/kg H₂. PEM elektrolizeri zahtevaju vodu visokog stepena čistoće, sa specifičnom električnom provodnošću manjom od 1 μS/cm, kako bi se sprečila degradacija membrane i produžio radni vek sistema. Da bi se obezbedio ovaj nivo kvaliteta, voda prolazi kroz proces filtracije, zatim reverzne osmoze, dok se finalno prečišćavanje vrši dejonizacijom pomoću jonskih smola. Primena ovakvog višestepenog tretmana omogućava dobijanje ultračiste vode neophodne za nesmetan rad PEM ćelija.

Izgradnja sistema za elektrolizu u blizini TENT-a A donosi značajnu prednost jer omogućava korišćenje postojeće infrastrukture. Konkretno, sistem za filtriranje vode mogao bi se nadograditi na već postojeći, čime bi se optimizovali troškovi i resursi.

4.2.2 Elektrolizer. PEM elektrolizer (PEM_{el}) predstavlja centralni deo postrojenja za proizvodnju vodonika. Njegova glavna prednost je relativno visoka energetska efikasnost pri velikoj gustini snage, kao i izražena fleksibilnost u radu, što ga čini pogodnim za primenu u sistemima sa visokim udelom obnovljivih izvora energije.

Za savremene industrijske PEM elektrolizere, energetska efikasnost se, u zavisnosti od izabrane radne tačke, kreće u opsegu od oko 50% do 68%, računato u odnosu na donju toplotnu moć vodonika. Povećanjem gustine struje dolazi do porasta proizvodnog kapaciteta elektrolizera, ali i do smanjenja efikasnosti. Izbor radnog režima predstavlja kompromis između maksimalne proizvodnje vodonika i ukupne energetske efikasnosti sistema.

Fleksibilnost PEM elektrolizera ogleda se u širokom dinamičkom opsegu rada od 5% do 120% kapaciteta, [13]. Zahvaljujući veoma brzom odzivu, sa vremenom promene opterećenja (*ramp rate*) reda sekundi, elektrolizer je u stanju da se prilagodi promenama ulazne snage bez negativnog uticaja na stabilnost sistema. Vreme pokretanja iz hladnog stanja (*cold start*) iznosi manje od 20 minuta, što omogućava njegovu primenu u uslovima izražene intermitentnosti i neupravljivosti obnovljivih izvora energije. Zbog svojih dobrih dinamičkih karakteristika, elektrolizeri mogu predstavljati značajan resurs centralizovane upravljive potrošnje, koja može biti regulacioni resurs za pružanje usluge regulacije aktivnih snaga u elektroenergetskom sistemu.

Proizvodnja vodonika u okviru razmatranog projekta direktno bi zavisila od kretanja cene električne energije na tržištu. Elektrolizeri bi bili podešeni da rade sa maksimalnim kapacitetom u periodima kada cena električne energije padne ispod unapred definisanog praga, na primer ispod 25% srednje godišnje cene. U intervalima kada se cena električne energije kreće između 25% i 150% srednje godišnje vrednosti, elektrolizeri bi bili puštani u rad sa smanjenim opterećenjem, i to isključivo u slučajevima kada proizvodnja električne energije iz solarnih elektrana ne može biti evakuisana u sistem zbog potencijalnih operativnih ograničenja u prenosnoj mreži.

U početnoj fazi projekta predviđena je izgradnja PEM elektrolizera instalisane snage 400 MW, koji bi delimično obezbeđivao potrebnu količinu gasovitog goriva za gasnu elektranu planiranu kao zamenu za agregate A1 i A2 u TENT-u A. Pri navedenoj instalisanoj snazi, očekivana proizvodnja vodonika iznosi do približno 8.000 kg/h, u zavisnosti od izabranog režima rada i energetske efikasnosti sistema.

Procenjeni radni vek savremenih PEM elektrolizera iznosi oko 60.000 do 80.000 radnih sati. Tokom eksploatacije dolazi do postepene degradacije performansi sistema, koja se najčešće ispoljava kroz porast radnog

napona i smanjenje energetske efikasnosti, sa tipičnim stopama degradacije u opsegu od 0,5% do 2,5% godišnje, [20]. Navedeni parametri imaju značajan uticaj na dugoročnu ekonomsku opravdanost projekta i moraju biti uzeti u obzir pri planiranju eksploatacije postrojenja.

Za postavljanje elektrolizerskog postrojenja potrebna je površina od oko 8 ha, pri čemu je poželjno da se lokacija nalazi u neposrednoj blizini termoelektrane, radi smanjenja infrastrukturnih troškova i lakše integracije u postojeći energetska sistem. Kao najpovoljnije rešenje razmatra se korišćenje dela postojećeg pepelišta. Pored proizvodnje vodonika, u budućnosti se ostavlja mogućnost dogradnje sistema za skladištenje kiseonika, ukoliko se na tržištu pojavi potreba za većim količinama ovog gasa, čime bi se dodatno povećala ukupna iskorišćenost postrojenja i ekonomska dobit projekta. U Prilogu 1 na slici A.2. nalazi se primer dispozicije opreme u jednom takvom postrojenju.

4.2.3 Skladištenje vodonika. Ono predstavlja poseban izazov. Kako je već rečeno, zbog izuzetno male zapremine gustine energije vodonika na atmosferskom pritisku, kao i težnje za što je moguće zapreminski manjim skladištima, neophodno je izložiti ga visokom pritisku (i do 800 bara). Vodonik kao element sa najmanjom atomskom masom ima tendenciju da prolazi kroz materijal i čini ga krhkim, te bi takvo curenje vodonika predstavljalo još jedan od problema pri izgradnji skladišta. Međutim, prednost ovakvog skladištenja jeste brza i laka upotreba i relativno jednostavna infrastruktura s obzirom na to da kompresori i rezervoari već postoje za industrijske namene, a problem curenja očekujemo da će se rešiti daljim istraživanjem i brzim napretkom tehnologije.

U ovoj analizi pretpostavljeno je da se skladišta vodonika dimenzionišu prema dnevnim ili nedeljnim potrebama, dok se dugoročno skladište planira kroz proizvodnju amonijaka. Pri proizvodnji i kompresiji vodonika oslobađa se značajna toplota, pa je u okviru energetskog kompleksa predviđeno i skladištenje toplote. Na Slici 4 prikazan je potencijalni prostor na kojem bi bio izgrađen energetska kompleks za proizvodnju i skladištenje vodonika, kao i infrastruktura jamskog toplotnog skladišta. Posmatrana lokacija nalazi se na delu odlagališta pepela. Pre svega za bilo kakvu gradnju na pepelištima neophodno je da se na lokaciji prestane sa odlaganjem pepela, da se odlagalište stabilizuje i da se sačeka sa izgradnjom dok se ne zaustavi intenzivno sleganje tla. S obzirom na to da postoje delovi odlagališta pepela čije su kasete zatvorene već duži niz godina, može se smatrati da i u postojećim uslovima postoje površine koje mogu biti iskorišćene za predloženu namenu. Naznačena površina ima 60 ha i dovoljna je za instalaciju svih infrastrukturnih elemenata kompleksa. U tom pogledu potrebna je reorganizacija postojećih planova korišćenja pepelišta za druge svrhe. Ovaj prostor je višestruko pogodan za instalaciju, kako sistema za proizvodnju i skladištenje vodonika tako i za jamsko toplotno skladište. Neke od ključnih prednosti ovog prostora su:

- lokacija je u neposrednoj blizini TENT-a A, na udaljenosti od svega 700 m, tako da predstavlja deo kompleksa termoelektrane i može se jednostavno dograditi elektroenergetska, termoeenergetska i putna infrastruktura za funkcionalnost svih elemenata sistema;
- lokacija je u neposrednoj blizini reke Save, što omogućava jednostavnu instalaciju sistema toplotnih pumpi za toplotno skladište, kao i sistema za obezbeđivanje vode za proces elektrolize;
- ne uzurpira se prostor koji ima poljoprivrednu vrednost i ne očekuju se negativni uticaji na mikrookolinu jer se radi o neplodnom veštačkom bregu;
- teren je izdignut iznad okoline za oko 30 m, tako da je zaštićen od poplava, kao i od prisustva podzemnih voda koje su vrlo nepovoljne za izgradnju toplotnog skladišta; u tom kontekstu potrebno je izvršiti planiranje korišćenja aktivnih pepelišta na način da ne ugrožavaju toplotno skladište;
- suv pepeo je kvalitetan toplotni izolator i može obezbediti dobru efikasnost skladištenja toplote;
- teren pogoduje izgradnji podzemnih rezervoara za skladištenje vodonika;
- elektrolizer i agregati u TENT-u A nalaze se na bliskom rastojanju sa ovde planiranim toplotnim skladištem, tako da je izgradnja infrastrukture za skladištenje otpadne toplote koja se dobija u ovim procesima jeftina i efikasna.



Slika 4. Predlog prostora za izgradnju energetskog kompleksa za proizvodnju i skladištenje vodonika i jamskog toplotnog skladišta na lokaciji TENT A

4.3 Razvoj sistema za sintezu amonijaka i lokalno sezonsko skladištenje

U slučajevima kada je skladište vodonika popunjeno, a postoje uslovi i mogućnost dalje proizvodnje, višak vodonika bi se koristio za proizvodnju amonijaka. Amonijak bi se dugoročno skladištio i koristio prevashodno u zimskom periodu, kada je proizvodnja električne energije iz fotonaponskih elektrana smanjena, a

cene električne energije na tržištu povećane, čime bi se omogućilo sezonsko bilansiranje elektroenergetskog sistema.

Proizvodnja amonijaka vršila bi se kombinovanjem vodonika i azota dobijenog iz vazduha primenom Haber–Bošovog procesa, pri temperaturama od 400–500°C, pritiscima od 100–200 bar i upotrebi gvozdених katalizatora, što je prikazano u Prilogu 1 na slici A.3.

Infrastruktura za sintezu i skladištenje amonijaka bila bi instalirana na lokaciji skladišta vodonika, radi racionalnog korišćenja prostora i postojeće infrastrukture. Azot, kao druga neophodna komponenta procesa, dobijao bi se izdvajanjem iz vazduha primenom kriogene jedinice za razdvajanje vazduha (ASU – *Air Separation Unit*), koja predstavlja najpogodnije rešenje za proizvodnju velikih količina azota visoke čistoće. Sistem ASU koristio bi stabilno napajanje električnom energijom iz mreže i sastojao bi se od kompresorskih jedinica, sistema za razmenu toplote i destilacionih kolona za razdvajanje gasnih komponenti.

Nakon pripreme, vodonik i azot uvodili bi se u sinteznu petlju (*synloop*), čije glavne komponente čine kompresori, menjivači toplote i reaktori za sintezu amonijaka. Kao krajnji proizvod dobijao bi se tečni amonijak (*Liquid ammonia*, NH_3). Otpadna toplota nastala tokom procesa sinteze delimično bi se koristila za potrebe samog procesa, dok bi se preostali deo mogao skladištiti u predviđenom toplotnom skladištu, čime bi se dodatno povećala ukupna energetska efikasnost sistema.

Skladištenje amonijaka zahteva poseban pristup zbog njegove toksičnosti i sposobnosti da izazove naponsku koroziju u ugljeničnim čelicima. U energetskim postrojenjima primenjuju se tri osnovna metoda skladištenja amonijaka: skladištenje pod pritiskom u čeličnim rezervoarima, rashlađeno skladištenje pri atmosferskom pritisku i niskim temperaturama, kao i kombinovani sistemi koji koriste umerene vrednosti temperature i pritiska. Za skladištenje velikih količina amonijaka, rashlađeno skladištenje predstavlja najpovoljniju opciju, jer u slučaju oštećenja rezervoara ispuštanje amonijaka protiče sporije nego kod skladištenja pod visokim pritiskom.

Jedan od značajnih izazova pri korišćenju amonijaka u energetskim sistemima jeste emisija azotnih oksida (NO_x), naročito pri sagorevanju na visokim temperaturama i pritiscima u gasnim turbinama. Za smanjenje NO_x emisija kao najefikasnija mera primenjuje se selektivna katalitička redukcija (SCR – *Selective Catalytic Reduction*), koja koristi katalizatore i redukcionu agens, najčešće amonijak ili ureu, radi pretvaranja azotnih oksida u azot i vodu paru. Ova tehnologija je kompatibilna sa savremenim gasnoturbinskim postrojenjima i već se primenjuje u termoelektranama. Uprkos primeni sistema za smanjenje emisija NO_x , direktno sagorevanje amonijaka u gasnim turbinama i dalje predstavlja tehnološki izazov usled njegovih nepovoljnih karakteristika sagorevanja. Zbog toga smatramo da je bolje amonijak ne koristiti direktno kao gorivo, već kao nosač vodonika. U ovom konceptu,

zeleni amonijak se u posebnom postrojenju za razlaganje (*ammonia cracking*) razlaže na vodonik i azot, pri čemu se dobijeni vodonik koristi u gasnim turbinama. Ovaj pristup omogućava smanjenje emisija NO_x i primenu tehnološki zrelijih gasnoturbinskih rešenja, dok direktno sagorevanje amonijaka ostaje perspektiva dugoročnog razvoja.

4.4 Izgradnja gasnoturbinskih postrojenja na mestu postojećih termoelektričnih blokova

Postojeći blokovi A1 i A2 bili bi zamenjeni gasnoturbinskim postrojenjima. Umesto kotlovskih postrojenja i parnih turbina koje koriste ugalj, na istim lokacijama mogu se instalirati gasnoturbinske jedinice koje će u početnim fazama koristiti mešavinu prirodnog gasa i vodonika, a dugoročno preći na potpuno sagorevanje zelenog vodonika i amonijaka, kada ovakva postrojenja budu tehnološki sazrela i ekonomski pristupačna. Pored prostornog aspekta, bitno je istaći da nove gasnoturbinske jedinice mogu iskoristiti postojeću priključnu opremu, kao što su blok-transformatori i rasklopna oprema. Stanje generatora u ovim blokovima je potrebno proveriti, ali se sugeriše ugradnja novih jedinica.

Gasnoturbinsko postrojenje sastoji se od tri celine: višestepena kompresija sa međuhlađenjem, komora za sagorevanje i ekspanzione turbine. Efikasnost pretvaranja goriva u električnu energiju zavisi od radne temperature turbine. Što su temperature više, veća je efikasnost, što znači ekonomičniji rad. Produkti sagorevanja u tipičnoj gasnoj turbini mogu dostići temperaturu od 1260°C , ali kritični metali u turbini mogu izdržati samo $815\text{--}926^\circ\text{C}$. Zato se koristi vazduh iz kompresora za hlađenje ključnih komponenti turbine, što smanjuje krajnju termičku efikasnost. Zahvaljujući inovativnim tehnologijama hlađenja i naprednim materijalima otpornim na visoke temperature, moderne gasne turbine sada postižu ulazne temperature do 1427°C , što je za 167°C više nego kod prethodnih turbina.

Još jedan način za povećanje efikasnosti je instalacija rekuperatora ili parnog generatora za iskorišćenje otpadne toplote (HRSG – *Heat Recovery Steam Generator*), koji omogućavaju povrat energije iz izduvnih gasova turbine. Rekuperator sakuplja otpadnu toplotu iz izduvnog sistema turbine i koristi je za predgrevanje vazduha iz kompresora pre nego što uđe u komoru za sagorevanje. Parni generator za iskorišćenje otpadne toplote (HRSG) koristi izduvnu toplotu gasne turbine za generisanje pare. Ovi kotlovi su takođe poznati kao parni generatori za rekuperaciju toplote. Para visokog pritiska iz ovih kotlova može se koristiti za proizvodnju dodatne električne energije pomoću parnih turbina, čime nastaje konfiguracija poznata kao kombinovani ciklus. Jednostavni ciklus gasne turbine može postići stepen konverzije energije u rasponu od 20% do 35%. Očekuje se da će buduće gasne turbine koje koriste vodonik u kombinovanom ciklusu dostići efikasnost od 60% ili više. Ako se otpadna toplota iz ovih sistema iskoristi za napajanje predviđenog toplotnog skladišta, ukupna efikasnost energetskog ciklusa mogla bi da dostigne i 80%.

U ovoj analizi pretpostavljeno je da se gasovito gorivo sagoreva u prisustvu vazduha i argona (koji se koristi kao inertni gas) kako bi se smanjila izlazna temperatura. Glavni proizvodi sagorevanja su azot (N_2) i voda (H_2O). S obzirom na to da je ukupna instalisana snaga agregata A1 i A2 oko 400 MW, da bi se iskoristila određena infrastruktura i obezbedili isti uslovi plasmana energije u prenosnu mrežu, gasna turbina će takođe biti snage 400 MW. Međutim, kao alternativno rešenje, umesto jednog gasnoturbinskog agregata velike snage, moguće je razmotriti i instalaciju dva ili tri gasnoturbinska agregata manje pojedinačne snage, što može doprineti većoj fleksibilnosti rada, pouzdanijem pogonu i lakšem održavanju sistema.

4.5 Razvoj sistema za skladištenje otpadne toplotne energije u svrhu grejanja

Efikasno iskorišćenje otpadne toplotne energije iz energetskih postrojenja predstavlja ključni korak ka povećanju energetske efikasnosti i smanjenju ukupnih gubitaka sistema. Deo otpadne toplote generiše elektrolizer, a deo elektrana. Gasnoturbinske elektrane, koje koriste mešavinu prirodnog gasa i vodonika ili čisti vodonik, generišu značajnu količinu otpadne toplote tokom procesa sagorevanja. Ova energija može se usmeriti na sisteme daljinskog grejanja, industrijske procese ili skladištenje u termalnim akumulatorima za kasniju upotrebu.

U ovoj analizi predloženo je korišćenje toplotnih akumulatora sa vodenim površinskim jamskim rezervoarima, gde voda kao medijum za skladištenje toplote omogućava lako prebacivanje energije u sisteme daljinskog grejanja.

S obzirom na to da je TENT A u blizini urbanog područja, gde postoji razvijen sistem daljinskog grejanja, otpadna toplota iz elektrane može se direktno koristiti za zagrevanje vode u jamskom skladištu toplote koje bi kasnije bilo korišćeno za zagrevanje vode u toplovodnoj mreži. Na ovaj način smanjuje se potreba za sagorevanjem dodatnih goriva, čime se doprinosi smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte i povećava ukupna energetska efikasnost sistema. Posebnu prednost ovakvom konceptu daje toplovodni sistem koji je planiran za izgradnju između Beograda i TENT-a A, koji bi omogućavao da se toplotno skladište uključi u sistem grejanja Beograda.

Uvođenjem sistema za korišćenje otpadne toplote, ukupna efikasnost gasnoturbinskih postrojenja može se povećati sa standardnih 55-60% na preko 80%, smanjujući istovremeno troškove grejanja i povećavajući isplativost energetskih objekata. Pored toga, upotreba skladištene toplote u industriji ili daljinskim sistemima grejanja smanjuje potrebu za dodatnim energetskim resursima i doprinosi razvoju održivih rešenja u energetskom sektoru.

5. SIMULACIJA ENERGETSKIH TOKOVA U PREDLOŽENOM KOMPLEKSU

U cilju detaljnije analize energetske performansi predloženog sistema, sprovedena je simulacija tokova energije kroz njegove glavne komponente. Simulacija omogućava uvid u raspodelu i efikasnost upotrebe energije, identifikaciju potencijalnih gubitaka, kao i ocenu ukupne energetske efikasnosti sistema.

Kao što je već rečeno, elektrolizeri bi radili u periodu niskih cena. U ovoj analizi je pretpostavljeno da je prag niskih cena pri kojem će doći do uključenja elektrolizera 25% srednje godišnje cene. Na grafiku na Slici A.4 iz Priloga ovaj prag je naznačen zelenom linijom. Gasne turbine bi bile u pogonu u periodima kada cena električne energije na referentnoj berzi prelazi 150% srednje godišnje cene, tj. kada je cena iznad crvene linije na grafiku na Slici 6. Takvim sistemom rada, a na osnovu satne cene električne energije [eur/MWh] na berzi HUPEX u toku 2024. godine, dobijen je broj radnih sati za oba sistema i granične cene, što se može videti u Prilogu 1 na Slici A.4, kao i u Tabeli II.

Tabela II Broj radnih sati elektrolizera i gasnih turbina

Srednja godišnja cena električne energije (HUPX-2024) [eur/MWh]	100,81
Cena električne energije na pragu za uključanje PEMel (proizvodnja vodonika) [eur/MWh]	25,20
Cena električne energije na pragu gasno-turbinskih postrojenja (potrošnja vodonika) [eur/MWh]	151,22
Broj sati rada PEMel sa maksimalnim kapacitetima (cena ispod 25%)	785,00
Broj sati rada gasnih turbina (cena veća od 150%)	1.058,00

U ovoj analizi pretpostavljeno je da je u energetskom kompleksu u prvoj fazi instaliran elektrolizer snage 400 MW. Proizvedeni vodonik će podmirivati deo potreba za rad gasne turbine, a ostatak će biti prirodni gas. Takvim PEM elektrolizerom i vremenom rada po pomenutom principu, na godišnjem nivou se iskoristi oko 340 GWh električne energije, a količina proizvedenog vodonika iznosi oko 6140 t, što čini nešto manje od 50% potrebne količine za potpunu supstituciju umešanog goriva čistim vodonikom. Gubici energije su neizbežan negativan faktor, pa tako dolazi i do gubitaka u sistemu pre samog procesa elektrolize, reda veličine nekoliko procenata, najčešće u opsegu od oko 5% do 10%, [21]. Zatim sledi proces PEM elektrolize, koji se odvija sa efikasnošću od oko 65%, dok je ostatak otpadna toplota čiji deo energije možemo da iskoristimo za zagrevanje vode u toplotnom skladištu. Ovim bi se namirila polovina potrebne energije za rad gasnih turbina, dok bi se ostatak dobijao iz prirodnog gasa. Pošto je energetska vrednost prirodnog gasa (LHV – lower heating value) 13,894 kWh/kg, lako možemo dobiti količinu gasa koja je potrebna za rad gasne turbine i ona na

godišnjem nivou iznosi 15.718 t. Maseni udeo vodonika pri umešavanju iznosi 28%. Dobijene količine energenata, njihova energetska vrednost, kao i udeo umešavanja, nalaze se u tabelama III i IV.

Efikasnost sistema gasnih turbina koji poseduje i parne turbine je oko 60%; shodno tome, dobija se konačna raspoloživa električna energija od oko 254 GWh.

Tabela III Potrebna količina energenata i njihova energetska vrednost

Instalisana snaga gasnih turbina [MW]	400,00
Instalisana snaga elektrolizera [MW]	400,00
Specifična potrošnja sistema [kWh/kg-H ₂]	55,30
Specifična potrošnja elektrolizera [kWh/kg-H ₂]	51,10
Energetski sadržaj vodonika – LHV [kWh/kg]	33,33
Energetski sadržaj metana – LHV [kWh/kg]	13,89
Efikasnost gasne turbine	40%
Dodatna iskorišćenost preko HRSG-a i parne turbine	20%
Ukupna efikasnost postrojenja (kombinovani ciklus)	60%
Efikasnost elektrolizera	65%
Potrebna količina prirodnog gasa za gasne turbine (100% metan) [t]	30.459,19
Potrebna količina vodonika za gasne turbine (100% vodonik) [t]	12.697,27
Proizvedena količina vodonika (mešovito gorivo) [t]	6.144,81
Potrebna količina prirodnog gasa za gasne turbine (mešovito gorivo) [t]	15.718,54

Tabela IV Energetska vrednost energenata

Energija sadržana u ukupno proizvedenoj količini vodonika [GWh]	204,81
Energija sadržana u prirodnom gasu [GWh]	218,39
Dobijena energija iz gasnih turbina [GWh]	253,92
Energetski procenat vodonika	48%
Energetski procenat gasa	52%
Procenat umešavanja vodonika (maseni)	28%

Pri svom radnom ciklusu i gasna turbina i elektrolizer poseduju gubitke u vidu otpadne toplote. Deo ove toplote, koji se javlja na pogodnom temperaturnom nivou, može biti tehnički iskorišćen i uskladišten u toplotne akumulatore. Ovakvo skladištenje toplotne energije pre svega je namenjeno kratkoročnom, odnosno neposrednom korišćenju, usled postojanja neizbežnih toplotnih gubitaka u akumulacionim sistemima. Za potrebe okvire procene usvaja se udeo tehnički iskoristive otpadne toplote od 14–15% u odnosu na električnu energiju dovedenu direktno u stek PEM elektrolizera, [22]. Raspoloživa količina energije koja se može skladištiti u vidu toplote prikazana je u Tabeli V.

Kada ponovo sumiramo ceo jedan energetski ciklus na godišnjem nivou, počevši od uložene električne energije u

Jelica Janičijević i ostali: Idejno rešenje supstitucije uglja kao goriva u blokovima A1 i A2 TE „Nikola Tesla” primenom vodoničnih tehnologija sa obnovljivim izvorima energije

proizvodnju vodonika kao energetskog nosioca, pa do ponovno proizvedene električne energije uz pomoć gasnih turbina, možemo dobiti efikasnost takvog procesa. Energetski tok i efikasnost godišnjeg ciklusa su prikazani u Tabeli VI. Prikazana efikasnost ciklusa sa iskorišćenjem toplote odnosi se na slučaj delimičnog korišćenja otpadne toplote gasne turbine i elektrolizera putem toplotnih akumulatora.

Tabela V Otpadna toplota

Energija koja se može iskoristiti u vidu toplote (oslobođena pri procesu elektrolize) [GWh/TJ]	47,10	169,56
Energija koja se može iskoristiti u vidu toplote (oslobođena pri radu turbine) [GWh/TJ]	84,64	304,70
Ukupna energija koja se može skladištiti u vidu toplote [GWh/TJ]	131,74	474,26

Tabela VI Efikasnost ciklusa

Energija uložena u PEMel sistem (uračunati su i gubici sistema) [GWh]	339,81
Deo energije PEMel uložena u rad elektrolizera [GWh]	314,00
Energija sadržana u ukupno proizvedenom vodoniku [GWh]	204,81
Energija sadržana u ukupno potrebnom prirodnom gasu [GWh]	218,39
Dobijena energija iz gasnih turbina [GWh]	253,92
Ukupna energija koja se može skladištiti u vidu toplote [GWh]	131,74
Efikasnost ciklusa bez iskorišćenja toplotne energije	45%
Efikasnost ciklusa (sa kratkoročnim čuvanjem toplote)	69%

Prema zadatim pretpostavkama, proizvodnja električne energije u gasnoturbinskim postrojenjima će se vršiti u periodima vrlo visokih cena na berzi električne energije, tako da će proizvedeni MWh u ovim postrojenjima imati visoku tržišnu vrednost. U Tabeli VII dati su podaci o bruto godišnjim prihodima analiziranog postrojenja.

Tabela VII Bruto godišnji prihod

Prosečna cena električne energije (ispod praga 25% srednje god.) [eur/ MWh]	0,71
Prosečna cena električne energije (iznad praga 150% srednje god.) [eur/ MWh]	254,62
Prosečna cena gasa [eur/MWh]	45,00
Cena kupljenog gasa [eur]	9.827.700,59
Cena kupljene el. energije za proizvodnju vodonika [eur]	242.428,27
Cena prodane energije proizvedene iz vodonika [eur]	64.652.690,40
Bruto godišnji prihod [eur]	54.582.561,54

Treba napomenuti da prilikom procene bruto godišnjeg prihoda nisu obuhvaćeni godišnji troškovi održavanja, koje je za sada teško proceniti. Za isplativost predloženog projekta potrebno je raspolagati podacima o investicijama u opremu i izgradnju sistema. Tehnologije za proizvodnju, skladištenje i korišćenje vodonika se intenzivno razvijaju, pri čemu su komercijalno dostupna rešenja ograničena, a njihova primena još uvek nije široko zastupljena. Iz tog razloga, aktuelna istraživanja prvenstveno su usmerena na unapređenje energetske efikasnosti ovih sistema i optimizaciju procesa konverzije energije. Sveobuhvatna

ekonomska opravdanost izgradnje sistema zasnovanih na vodoniku moći će se realnije sagledati u narednom periodu, kada tehnologije dostignu viši stepen komercijalne zrelosti, uz očekivano smanjenje investicionih troškova i povećanje efikasnosti.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirano je idejno rešenje prelaska termoelektronskih blokova A1 i A2 u TENT-u A sa fosilnih goriva na gasnoturbinske sisteme sa vodonikom kao primarnim gorivom. Razmatrani su tehnološki trendovi u proizvodnji i skladištenju zelenog vodonika, kao i integracija obnovljivih izvora energije u cilju dekarbonizacije elektroenergetskog sektora.

Jedan od ključnih izazova u ovom procesu jeste efikasnost konverzije električne energije u vodonik putem elektrolize, kao i gubici prilikom sagorevanja u gasnim turbinama. Analizirani su pokazatelji efikasnosti ovih procesa, pri čemu se pokazalo da postoje značajni energetski gubici, ali i da razvoj novih tehnologija može doprineti optimizaciji celokupnog sistema.

Takođe, posebna pažnja posvećena je skladištenju vodonika i njegovih derivata, poput amonijaka, kao potencijalnih rešenja za sezonsko bilansiranje energetskog sistema. Pored toga, razmatrana je mogućnost korišćenja otpadne toplotne energije za grejanje, čime bi se dodatno poboljšala energetska efikasnost energetskog kompleksa.

Predloženo rešenje obuhvata izgradnju fotonaponske elektrane instalisane snage fotonaponskih panela od 500 MWp na delovima ugljenokopa „Kolubara”, koja bi godišnje proizvela oko 522 GWh električne energije. Proizvodnja vodonika bi se odvijala u periodima niske cene električne energije na regionalnom tržištu. Na osnovu podataka sa berze HUPLEX proračunati su troškovi proizvodnje vodonika, kao i prihodi koji se mogu ostvariti radom gasnoturbinskog postrojenja. Zaključeno je da godišnji bruto prihod može biti i preko 50 miliona evra.

Generalno, rezultati rada ukazuju na to da je tranzicija termoelektrana na uglj u gasnoturbinska postrojenja na vodonik tehnički izvodiva, ali trenutno veoma skupa i zahteva dalja ulaganja u istraživanje i razvoj, kako bi se povećala efikasnost celokupnog lanca proizvodnje, skladištenja i konverzije energije. Ipak, ovakav proces može biti aktuelan i sproveden tako da se u prvoj fazi izgrade proizvodna gasnoturbinska postrojenja koja bi radila na prirodni gas, a da se sa razvojem vodoničnih tehnologija vrši postepeno uvođenje vodonika kroz umešavanje. Dakle, potrebno je sistem planirati i tehnološki opremiti tako da može raditi sa bilo kojim stepenom umešavanja vodonika uključujući i čisti vodonik. Ovaj pristup bi omogućio da se istom tehnologijom izvrši tranzicija što bi doprinelo stabilnosti elektroenergetskog sistema i postepenoj dekarbonizaciji proizvodnje električne energije u EES-u Srbije.

Pored toga, ovaj pristup ide na stranu jačanja energetske nezavisnosti Srbije jer bi u krajnjem ishodu sva energija za proizvodnju vodonika bila proizvedena iz fotonaponskih i vetroelektrana na teritoriji Srbije. Ovaj pristup bi omogućio i dekarbonizaciju dela

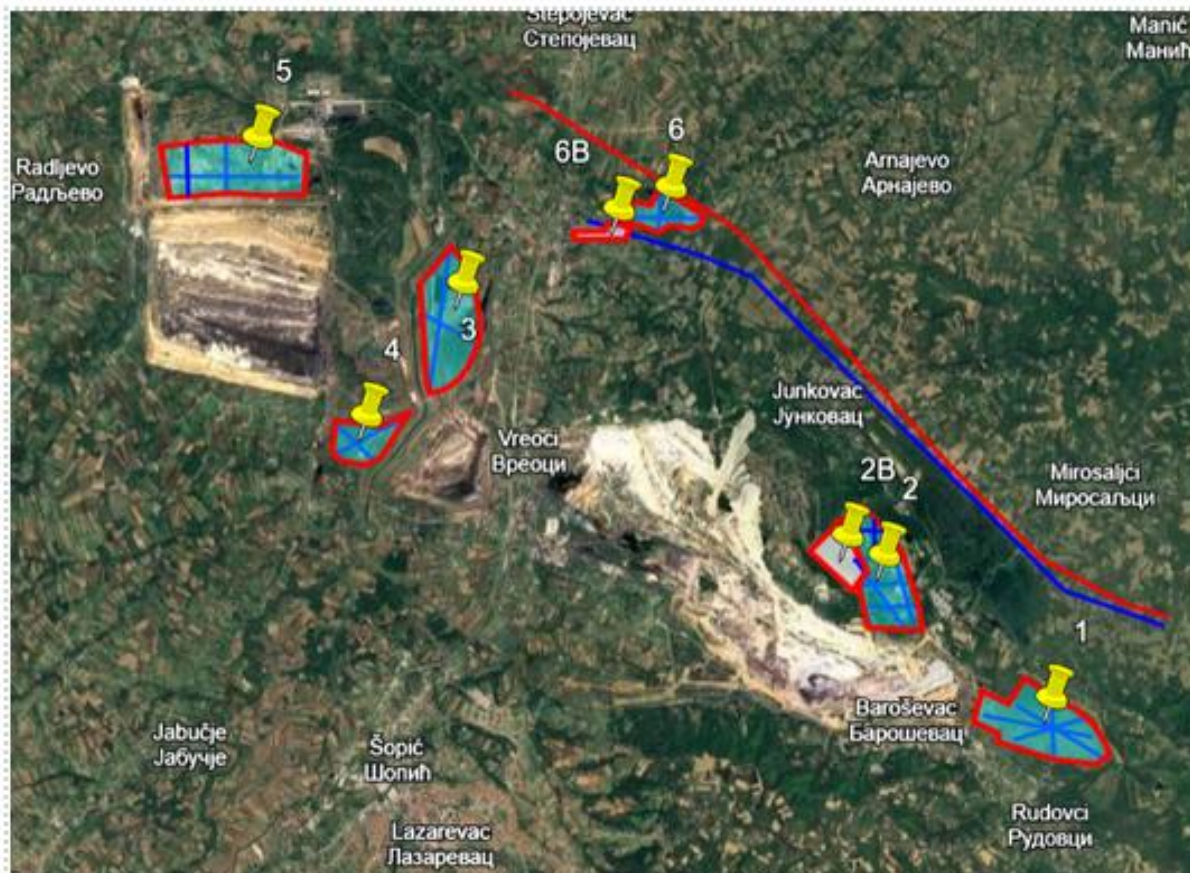
termoenergetskog sektora, što bi bitno doprinelo rešavanju problema lošeg kvaliteta vazduha. Predloženo rešenje zahteva minimalnu konceptualnu promenu i izgradnju nedostajuće infrastrukture u prenosnoj mreži, jer podrazumeva korišćenje već postojećeg energetskog čvorišta, što bi bitno smanjilo troškove u pogledu integracije obnovljivih izvora u EES.

LITERATURA

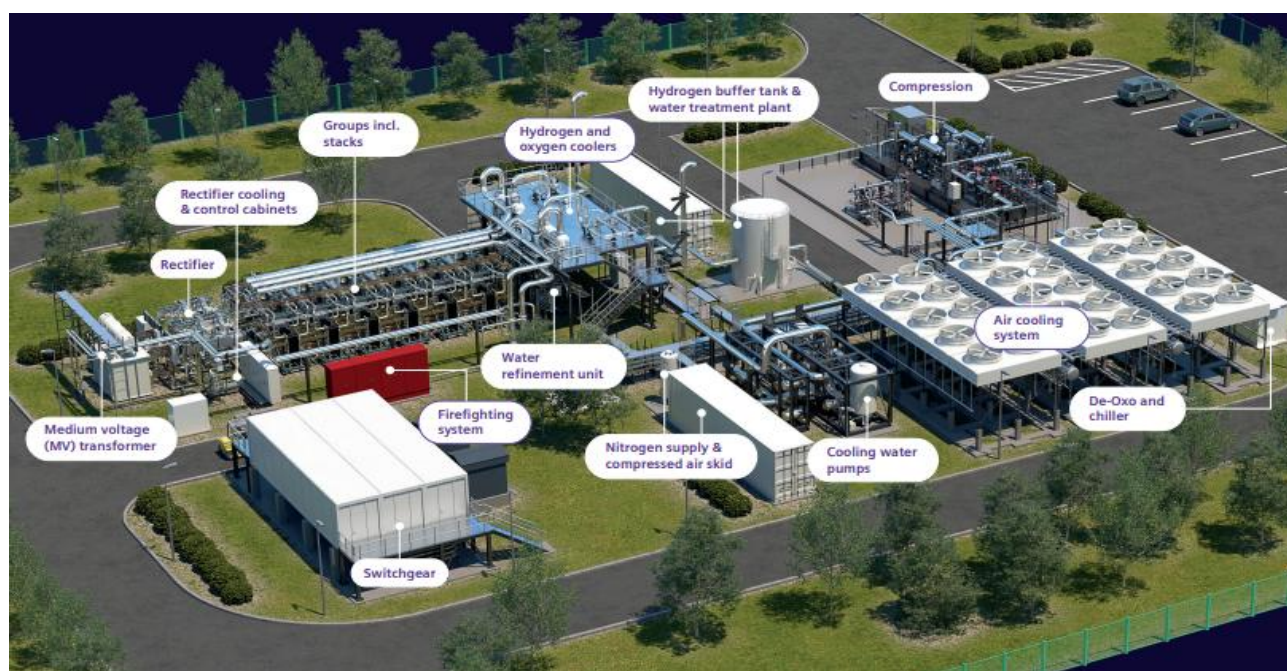
- [1] „H2RES – Green Hydrogen Production” [Internet]. [citirano 28. 3. 2026]. Dostupno na: <https://stateofgreen.com/en/solutions/h2res-green-hydrogen-production/>
- [2] „Share of green hydrogen in Vienna cogeneration plant reaches 15%” [Internet]. [citirano 28. 3. 2026]. Dostupno na: <https://balkangreenenergynews.com/share-of-green-hydrogen-in-vienna-cogeneration-plant-reaches-15/>
- [3] Alstom, „Coradia iLint – World’s first hydrogen-powered passenger train” [Internet]. [citirano 28. 3. 2026]. Dostupno na: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-passenger-train>
- [4] „Hydrogen Economy Roadmap of Korea” [Internet]. [citirano 28. 3. 2026]. Dostupno na: 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]. [citirano 28. 3. 2026]. Dostupno na: <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]. [citirano 28. 3. 2026]. Dostupno na: <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]. [citirano 28. 3. 2026]. Dostupno na: [energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics](https://www.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]. [citirano 28.03.2026]. Dostupno na: <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]. [citirano 28. 3. 2026]. Dostupno na: <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]. [citirano 28. 3. 2026]. Dostupno na: <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.

Jelica Janičijević i ostali: Idejno rešenje supstitucije uglja kao goriva u blokovima A1 i A2 TE „Nikola Tesla” primenom vodoničnih tehnologija sa obnovljivim izvorima energije

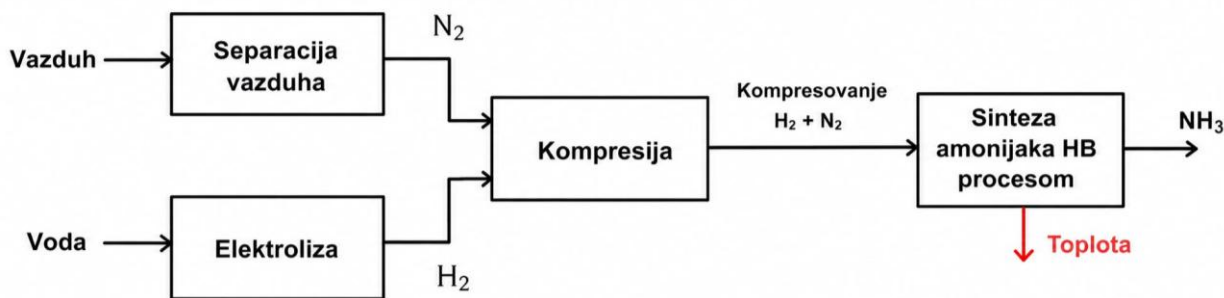
DODATAK (PRILOG) 1



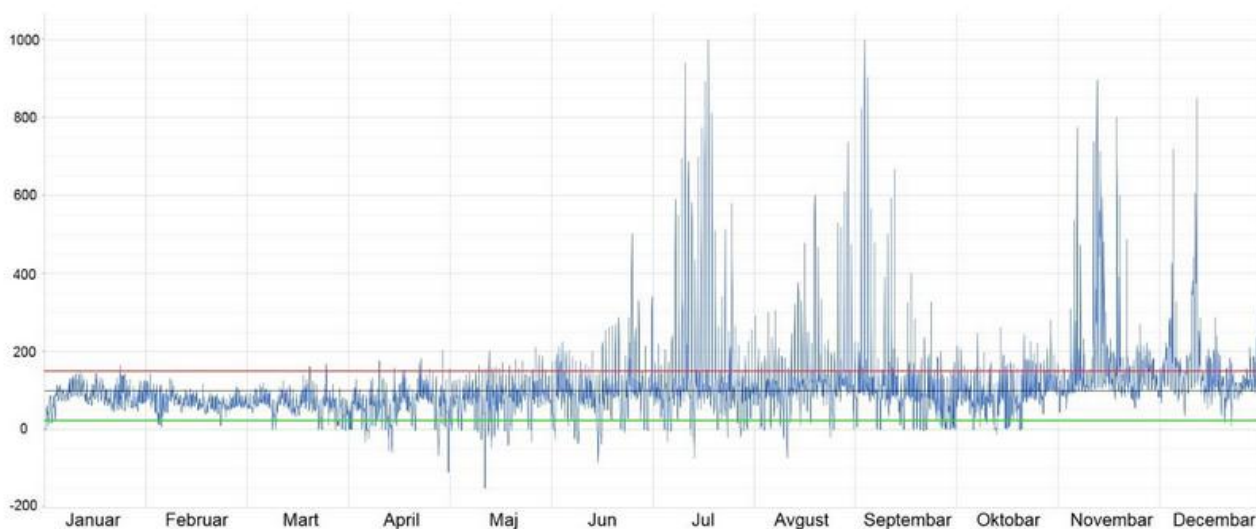
Slika A.1. Trenutno raspoložive površine na kojima se može planirati izgradnja fotonaponske elektrane na ugljenokopu „Kolubara”



Slika A.2. Dispozicija opreme u sistemu za proizvodnju vodonika, [23]



Slika A.3. Principijska šema proizvodnje amonijaka Haber-Bošovim procesom, [24]



Slika A.4. Grafički prikaz cena električne energije na berzi HUPEX za godinu 2024. sa naznačenim granicama u odnosu na koje se pogone elektrolizera i gasne turbine

BIOGRAFIJE



Jelica Janićijević je rođena 2003. godine u Beogradu, Republika Srbija. Završila je 7. i 8. razred osnovne škole i srednju školu u specijalnom, mentorskom odeljenju u Matematičkoj gimnaziji. Trenutno je student četvrte godine osnovnih akademskih studija na

Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na smeru Energetika.

Tokom osnovnog i srednjeg obrazovanja učestvovala je i osvajala nagrade na državnim takmičenjima iz fizike i matematike, a bila je i član Istraživačke stanice Petnica. U toku studija učestvovala je u projektima projektovanja više elektroenergetskih trafostanica. Autor je studentskog stručnog rada koji je izložen na savetovanju CIGRE Srbija 2025, gde je nagrađen kao najzapaženiji studentski rad. Autor je i rada izlaganog na savetovanju CIREC Crna Gora 2026, koji je takođe nagrađen kao najzapaženiji rad u

svojoj sesiji. Dobitnica je nagrade Fondacije „Gordana Jokić Kašiković i Dragiša Kašiković” za najbolji studentski rad 2025. godine. Dobitnica je stipendije Ministarstva prosvete Republike Srbije za nadarene studente. Takođe, dodeljeno joj je priznanje „Elektromreže Srbije” u vidu stipendije kao rezultat visokih akademskih postignuća. Za ostvaren izuzetan uspeh tokom studija nagrađena je i priznanjem za najboljeg studenta na smeru Energetika u trećoj i četvrtoj godini studija.

ORCID: 0009-0002-6205-5587



Danilo Vlahović je rođen 2003. godine u Vršcu, Republika Srbija. Osnovnu školu „Jovan Sterija Popović” završio je kao učenik generacije, a srednjoškolsko obrazovanje stekao je u Gimnaziji „Borislav Petrov Braca” u Vršcu. Trenutno je student četvrte godine osnovnih akademskih studija na

Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na smeru Energetika.

Jelica Janičijević i ostali: Idejno rešenje supstitucije uglja kao goriva u blokovima A1 i A2 TE „Nikola Tesla” primenom vodoničnih tehnologija sa obnovljivim izvorima energije

Dobitnik je stipendije Ministarstva prosvete Republike Srbije za izuzetno nadarene učenike i studente, stipendije „Elektromreže Srbije”, takođe je i stipendista Fondacije „Studenica”. Tokom školovanja ostvario je zapažene rezultate na državnim takmičenjima iz matematike i fizike, uključujući prvu nagradu na Republičkom takmičenju iz fizike i plasman na Srpsku fizičku olimpijadu. Učestvovao je i na međunarodnom ekipnom takmičenju iz fizike FYKOS.

U okviru projektnih aktivnosti izradio je rad „Akustični levitator”, nagrađen drugim mestom na Republičkom takmičenju, kao i studentski rad izložen na savetovanju CIGRE Srbija 2025, koji je nagrađen kao najzapaženiji studentski rad. Pomenuti rad je nagrađen i od Fondacije „Gordana Jokić Kašiković i Dragiša Kašiković” za najbolji studentski rad 2025. godine. Autor je i rada izlaganog na savetovanju CIREĐ Crna Gora 2026, koji je takođe nagrađen kao najzapaženiji rad u svojoj sesiji. Njegova glavna interesovanja obuhvataju obnovljive izvore energije, vodonik, elektroenergetske sisteme, energetska tranziciju i skladištenje energije.

ORCID: 0009-0007-9784-9084



Aleksandar Latinović je rođen 1986. godine u Bihaću, Bosna i Hercegovina. Osnovnu školu završio je u Lazarevu, selu nadomak Zrenjanina, a potom Zrenjaninsku gimnaziju. Diplomski i master studije završio je na Elektrotehničkom

fakultetu u Beogradu, Odsek energetika. Od 2010. godine do 2025. godine kao zaposleni EPS AD radio je na

poslovima koji se tiču pomoćnih usluga, sistemskih softvera za upravljanje procesima proizvodnje i održavanja, SCADA sistema, a radio je na razvoju i izgradnji OIE projekata. Član je CIGRE komiteta C2. Bio je član više radnih grupa MRE koje su radile na izradi i usaglašavanju tehničke i zakonske regulative koja je imala cilj integraciju OIE u EES Republike Srbije. Od 2025. godine je samostalni konsultant sa ekspertizom u tehničkim aspektima balansiranja sistema.

ORCID: 0009-0000-0194-4618



Željko R. Đurišić je rođen 1972. godine u selu Babino, Berane, Crna Gora. Osnovnu školu je završio u rodnom selu, a srednju elektrotehničku školu u Beranama. Diplomski, master i doktorske studije je završio na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu,

na smeru Elektroenergetski sistemi. Od 2001. godine zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, gde je prošao sva saradnička i nastavnička zvanja, a od 2023. godine je u zvanju redovnog profesora. Rukovodilac je Laboratorije za elektrane. Njegov naučni rad je dominantno usmeren ka planiranju, integraciji i eksploataciji obnovljivih izvora energije u elektroenergetskim sistemima. Koautor je četiri udžbenika i oko 300 naučno-stručnih radova, od kojih je 40 publikovano u međunarodnim časopisima sa SCI liste. Bio je mentor pri izradi sedam doktorskih disertacija i oko 300 diplomskih i master radova na elektrotehničkim fakultetima u Beogradu i Istočnom Sarajevu.

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/10.2478/2688-7667.1234567890>), 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

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

Napajanje alkalnih elektrolizera dvanaestopulsnim ispravljačima bez interfazne prigušnice

¹ Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija*

Stručni rad

Ključne poruke

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

Kratak sadržaj

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

Ključne reči

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

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

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

Napomena:

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

1. UVOD

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

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



Slika 1. Izgled alkalnog elektrolizera

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

2. ENERGETSKI PRETVARAČI ZA ELEKTROLIZU VODE

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

3. TOPOLOGIJA DVANAESTOPULSNOG ISPRAVLJAČA BEZ INTERFAZNE PRIGUŠNICE

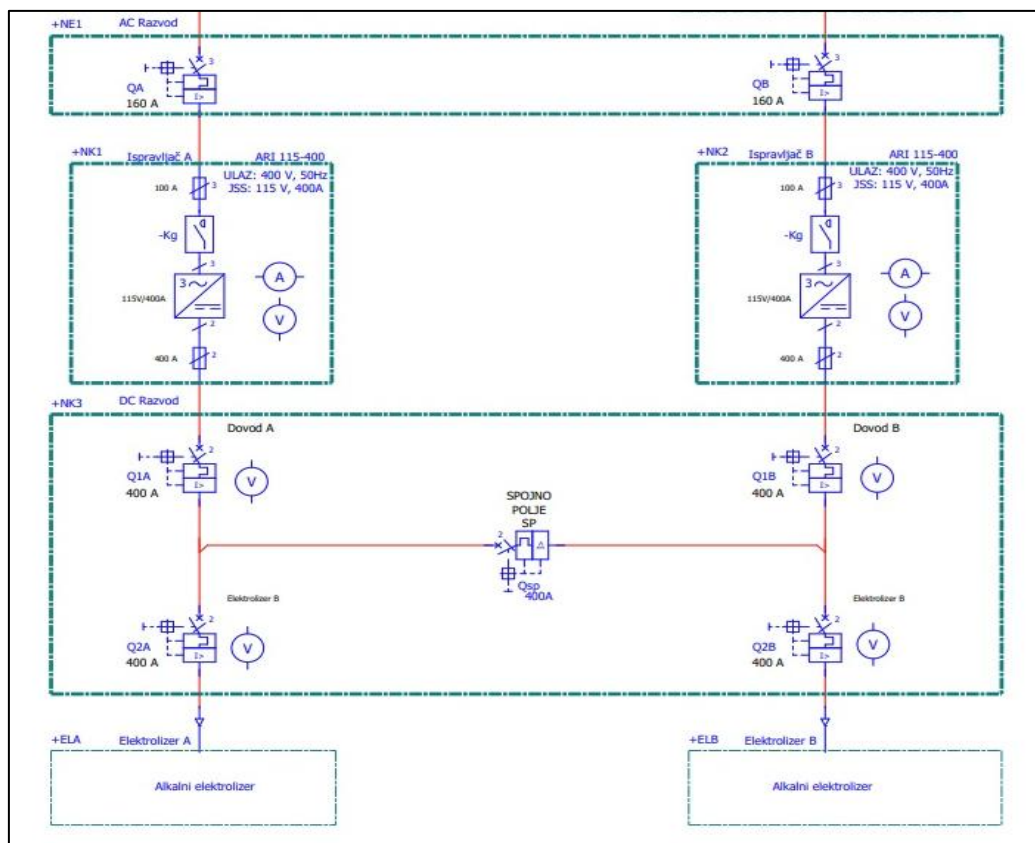
Za potrebe proizvodnje vodonika, namenjenog za hlađenje generatora u termoelektrani, izrađeno je elektropostrojenje za napajanje elektrolizera jednosmernom strujom. Sastoji se od naizmeničnog razvoda, dva identična ispravljača i jednosmernog razvoda, preko koga se napajaju dva alkalna elektrolizera (slike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



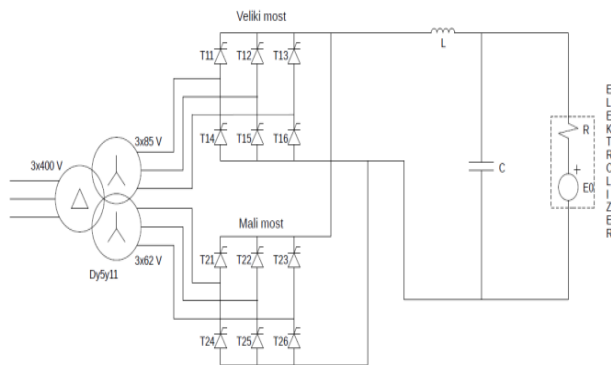
Slika 2. Novo postrojenje za napajanje elektrolizera

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

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

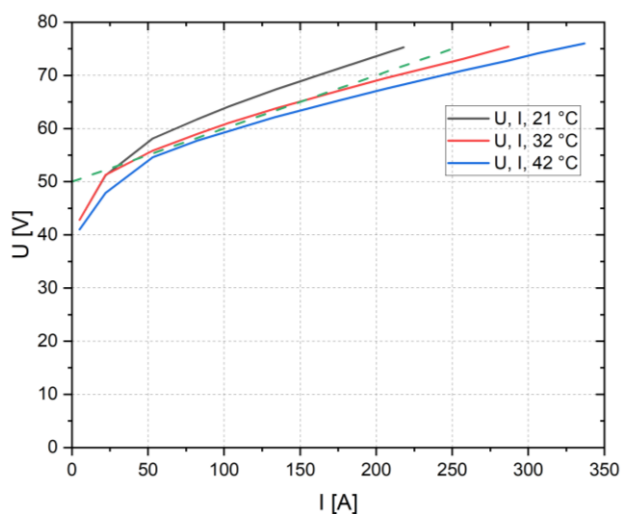


Slika 3. Jednopolna šema postrojenja za napajanje elektrolizera



Slika 4. Topologija ispravljača sa modelom alkalnog elektrolizera

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



Slika 5. Statička karakteristika elektrolizera sa linearizovanom karakteristikom modela

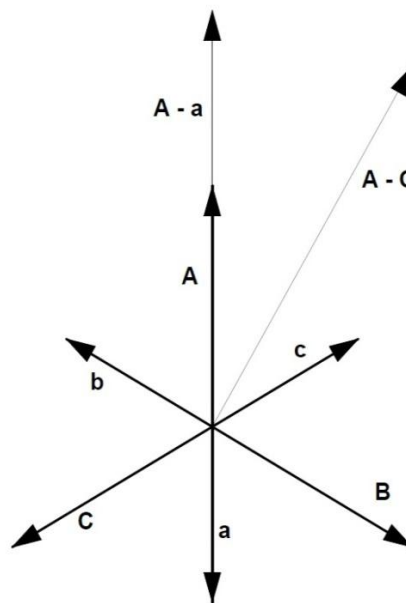
Na Slici 6 prikazan je vektorski dijagram faznih napona na ulazu malog mosta (**a**, **b** i **c**) i na ulazu velikog mosta (**A**, **B** i **C**). Vektori napona će ovde biti označavani boldovanim slovima. Dakle, vrednosti napona sekundara i tercijera transformatora (ulazni naponi velikog i malog mosta,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

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

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

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

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



Slika 6. Vektorski dijagram napona ispravljača

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



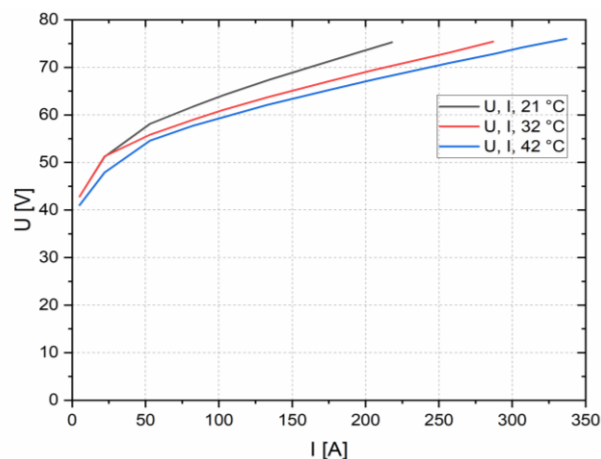
Slika 7. Izgled ispravljača – prednja strana



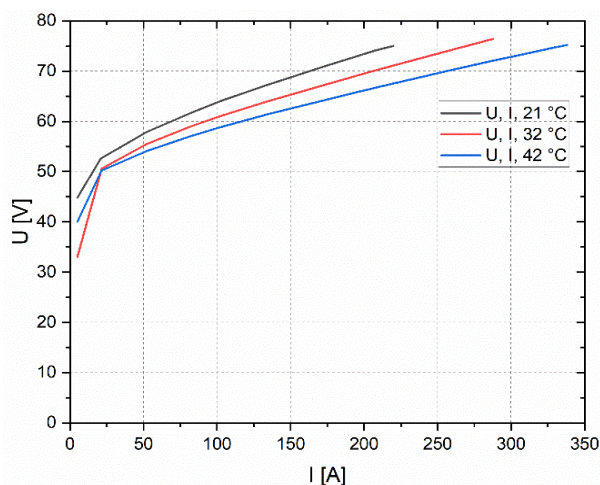
Slika 8. Izgled ispravljača – zadnja strana

4. MERENJA ULAZNO-IZLAZNIH VELIČINA I ANALIZA RADA ISPRAVLJAČA

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



Slika 9. Statička karakteristika elektrolizera 1



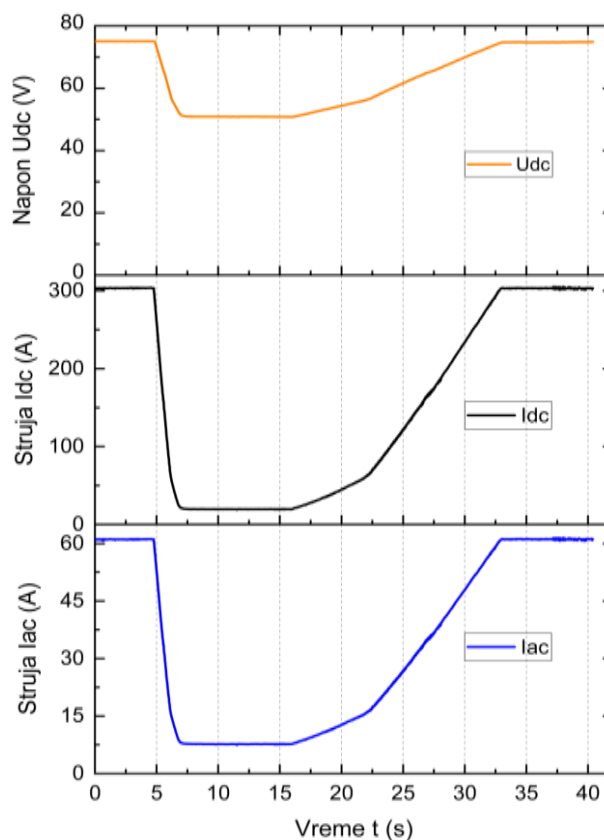
Slika 10. Statička karakteristika elektrolizera 2

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

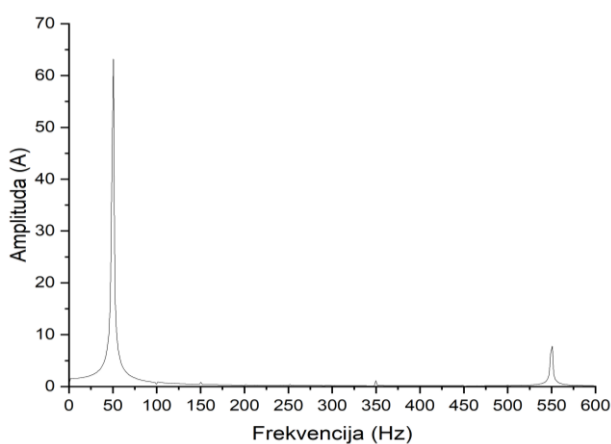
Napon napajanja ispravljača je bio konstantan (3×400 Vac), i nije grafički prikazan. Sa Slike 11 može se uočiti i rezistivni karakter opterećenja elektrolizera. Spektralnom analizom struje mreže koja se ima pri struji elektrolizera od 300 A, može se videti da su peti i sedmi harmonik zaista potisnuti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

5. PRAVCI RAZVOJA PROIZVODNJE VODONIKA ELEKTROLIZOM VODE

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



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



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

5.1. Razvoj elektrolizera

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

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

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

5.2 Razvoj napajanja

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

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

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

5.3. Vodonik u elektroenergetskom sistemu budućnosti

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

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

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

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

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

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

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

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

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

6. ZAKLJUČAK

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

LITERATURA

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

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

BIOGRAFIJE



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

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

ORCID: 0009-0004-9864-5305



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

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

ORCID: 0009-0003-7115-9887

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

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

¹ Nikola Tesla Institute, Belgrade, Serbia*

Professional article

Highlights

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

Abstract

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

Keywords

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

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

E - mail: nikola.kovacevic@ieent.org

Note:

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



Miroslav Popović¹, Aleksandar Milić¹, Nikola Mirković²

Modelovanje gubitaka GaN prekidača na osnovu kataloških podataka

¹ Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija*

² Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” AD, Beograd, Srbija



Originalni naučno-istraživački rad

Ključne poruke

- Izvođenje algoritma za ocenu gubitaka GaN prekidača snage
- Poređenje tvrdih, mekih i polumekih prekidačkih procesa i izdvajanje strujnog doprinosa kanala i parazitnih kapacitivnosti
- Verifikacija modela kroz prototip sinhronog spuštača napona snage 1 kW

Kratak sadržaj

Prekidači zasnovani na savremenim poluprovodnicima velikog energetskeg procesa, kao što je galijum-nitrid (GaN), sve češće se koriste u uređajima energetske elektronike. Zbog specifične strukture i sposobnosti da brzo menjaju radno stanje, standardni proračuni koji se koriste za određivanje gubitaka u silicijumskim prekidačima nisu primenljivi u ovom slučaju. Stoga je razvijen analitički model za procenu gubitaka kod GaN prekidača u konfiguraciji polumosta, koji se oslanja na podatke iz tehničke dokumentacije. Model uzima u obzir različite tipove komutacija, kao što su tvrdo, meko i polumeko komutovanje. Izvršeno je poređenje gubitaka pri mekom i tvrdom komutovanju prekidača u sklopu sinhronog spuštača napona. Na osnovu predloženog modela određena su vremena trajanja komutacija, koja su iskorišćena kako bi se verifikovao predloženi model na pretvaraču spuštaču napona snage 1 kW.

Ključne reči

GaN prekidači snage, model gubitaka, sinhroni spuštač napona

Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju studentskog rada „Analitički model gubitaka GaN tranzistora na osnovu podataka iz tehničke dokumentacije” (<https://doi.ub.bg.ac.rs/doi/cigre37-b4-05/>), nagrađenog u Studijskom komitetu STK-B4 HVDC i energetska elektronika, na 37. Savetovanju CIGRE Srbija, Zlatibor, 26-30. maja 2025.

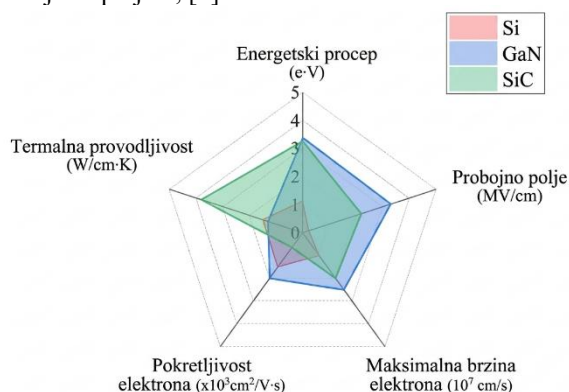
Primljeno: 16. decembar 2025. Recenzirano: 3. jul 2026.
Izmenjeno: 8. jul 2026. Odobreno: 22. jul 2026.

* Korespondirajući autor: Miroslav Popović

Imejl: miroslav@etf.bg.ac.rs

1. UVOD

Višedecenijski napredak u razvoju uređaja energetske elektronike doveo je do skoro potpunog iskorišćenja potencijala prekidača snage zasnovanih na silicijumskoj (Si) tehnologiji. Zbog toga je dalji razvoj pretvarača koji se oslanjaju na ovu vrstu poluprovodnika postao znatno složeniji. Međutim, pojava prekidača koji koriste poluprovodnike sa visokim energetske procepmom, kao što su galijum-nitrid (GaN) i silicijum-karbid (SiC), omogućila je dizajn novih topologija, kao i postizanje veće efikasnosti i manjih dimenzija pretvarača, [1]. Kao što je prikazano na Slici 1, GaN poluprovodnici u poređenju sa Si i SiC, odlikuju se većom elektronskom pokretljivošću, većom maksimalnom brzinom elektrona i većim probojnim poljem, [1].



Slika 1. Uporedna analiza poluprovodničkih tehnologija, [1]

S obzirom na to da GaN materijal ima znatno veći energetski procep i probajno polje u odnosu na silicijumske poluprovodnike, omogućen je dizajn kraćeg provodnog kanala unutar prekidača za istu vrednost probajnog napona. Kraći provodni kanal, zajedno sa većom gustinom pakovanja GaN prekidača, dovodi do manjeg otpora provodnog kanala i smanjenih parazitnih kapacitivnosti. Navedene osobine pružaju manju snagu gubitaka tokom procesa uključivanja i isključivanja prekidača, što omogućava postizanje značajno većih prekidačkih učestanosti, [2].

Da bi se iskoristio pun potencijal GaN prekidača, potrebno je napraviti pouzdan fizički model koji opisuje proces prekidanja, radi određivanja ukupnih gubitaka snage i maksimalne učestanosti prekidanja. Do sada razvijeni modeli prekidanja za Si prekidače nisu primenljivi na GaN uređaje, budući da je hemijska i fizička struktura ovih prekidača drugačija, [2], [3]. Proces prekidanja kod GaN prekidača i Si prekidača, iako na prvi pogled sličan, znatno se razlikuje. Galijum-nitridna tehnologija omogućava veću brzinu prekidanja, pri čemu uticaj nelinearnih parazitnih kapacitivnosti postaje značajan i ne može se zanemariti. Uz to, principi provođenja i uspostavljanje provodnog kanala razlikuju se u poređenju sa silicijumskim prekidačima. U [4] prikazan je deo po deo linearni model gubitaka. Ovakav pristup omogućava brzu i jednostavnu ocenu gubitaka, ali ne uvažava nelinearnu zavisnost parazitnih kapacitivnosti od korespondirajućih napona, usled čega dolazi do značajnih

grešaka u proceni pri učestanostima prekidanja u oblasti od nekoliko stotina kiloherca. Detaljniji model gubitaka predstavljen je u [5] i uvažava nelinearnu zavisnost parazitnih kapacitivnosti, ali zanemaruje nelinearnu zavisnost transkonduktanse GaN prekidača snage. Imajući u vidu navedena ograničenja, u ovom radu razvijen je analitički model prekidanja GaN prekidača koji istovremeno uvažava nelinearne zavisnosti parazitnih kapacitivnosti i transkonduktanse, te omogućava precizno određivanje ukupnih gubitaka snage na prekidaču u poređenju sa trenutno dostupnim rešenjima u literaturi. Razvijeni model se zasniva na neaproximiranim podacima iz tehničke dokumentacije proizvođača i uzima u obzir fizičku strukturu prekidača.

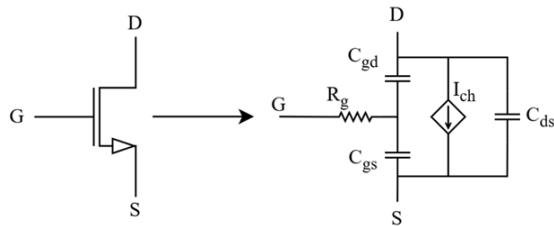
U Poglavlju 2 opisan je model GaN prekidača i fizičke zavisnosti između modelovanih elemenata. Prilikom modelovanja, radi preciznijeg određivanja gubitaka, ukupna struja prekidača podeljena je na dva doprinosa – struju provodnog kanala i struju parazitnih kapacitivnosti. Naime, tokom komutacije ne protiče celokupna struja isključivo kroz provodni kanal prekidača snage. Značajan deo struje, posebno u fazama prelaza, odvaja se na punjenje i pražnjenje parazitnih kapacitivnosti uređaja, što direktno utiče na dinamičko ponašanje prekidača i utiče na ukupne komutacione gubitke. Zbog toga je ova podela, pored uvažavanja nelinearnih kapacitivnosti i transkonduktanse GaN prekidača snage, ključna za realistično modelovanje i tačnu ocenu energetskih gubitaka tokom rada prekidača, [2]. Takođe, uključivanje i isključivanje prekidača podeljeno je u segmente i detaljno je opisano za prekidače u konfiguraciji polumosta. Za odabrani prekidač u Poglavlju 3 prikazano je izdvajanje relevantnih podataka iz tehničke dokumentacije i prikazan je algoritam za ocenu gubitaka. Na samom kraju, eksperimentalni rezultati, koji potvrđuju pouzdanost modela, dati su u Poglavlju 4.

2. MODEL PREKIDAČA I KOMUTACIONOG PROCESA

Prekidači snage zasnovani na GaN tehnologiji, iako po svojoj strukturi podsećaju na Si MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) uređaje, poseduju određene specifičnosti koje značajno utiču na njihovo ponašanje prilikom prekidanja. U ovom poglavlju detaljno je opisan električni model GaN prekidača sa akcentom na ključne razlike u odnosu na klasične silicijumske MOSFET prekidače. Za potrebe analitičkog modelovanja i proračuna gubitaka snage na prekidačima dati su i detaljno opisani teorijski i analitički procesi prekidanja za slučaj uključivanja i isključivanja prekidača u polumosnoj konfiguraciji. Kao rezultat dobija se sistem diferencijalnih jednačina putem kojeg se mogu odrediti vremenski oblici struje kanala $I_{ch}(t)$ i napona kanala $v_{ds}(t)$ potrebni za proračun gubitaka tokom procesa uključivanja i isključivanja prekidača. Model GaN prekidača prikazan je na Slici 2 i u velikoj meri odgovara modelu Si MOSFET prekidača.

Glavna razlika ogleda se u odsustvu ugrađene diode za provođenje struje u suprotnom smeru. Zbog svoje simetrične strukture, prilikom provođenja struje u suprotnom smeru drejn (*drain*) i sors (*source*) elektrode menjaju svoju ulogu. Potencijal drejn elektrode je sada niži od gejt (*gate*) potencijala, tako da sada napon v_{gd} diktira

provodnost kanala i omogućava prekidaču da provodi struju. U daljem tekstu ovaj mehanizam provođenja biće nazvan inverzno provođenje GaN prekidača.

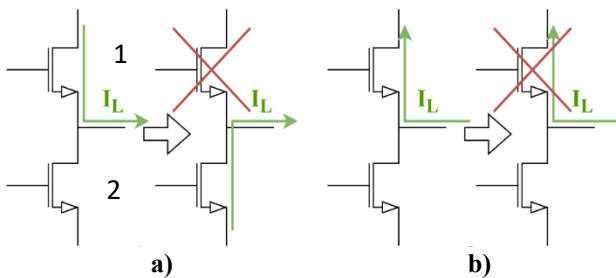


Slika 2. Model GaN prekidača

2.1 Prekidački proces prekidača snage u polumosnoj konfiguraciji

Dva prekidača u polumosnoj konfiguraciji predstavljaju univerzalnu prekidačku ćeliju u savremenim energetskim pretvaračima snage, [1]. Iako ova konfiguracija nije prisutna u doslovno svakoj topologiji, većina praktičnih arhitektura pretvarača snage može se razložiti na ćelije u polumosnoj konfiguraciji ili na neke njihove proširene varijante, [6]. U ovom potpoglavlju biće izveden i detaljno objašnjen proces prekidanja dva GaN prekidača u polumosnoj konfiguraciji. Na osnovu izvedenog modela, u Poglavlju 3 biće projektovan algoritam za ocenu gubitaka na prekidačima.

Prekidanje prekidača u polumosnoj konfiguraciji predstavlja proces prebacivanja struje sa jednog prekidača na drugi. Da bi se sprečio kratak spoj (*shoot-through*) između gornjeg i donjeg prekidača u polumostu, uvodi se koncept mrtvog vremena (*dead time*). To je kratak vremenski razmak između trenutka isključenja jednog prekidača i trenutka uključivanja drugog prekidača. Mrtvo vreme osigurava da prvi prekidač u potpunosti bude isključen pre nego što se pošalje signal za uključivanje drugog prekidača, čime se efikasno sprečava pojava provođenja struje kroz oba prekidača. Prekidački proces u polumosnoj konfiguraciji uslovljen je radnim režimom pretvarača, to jest smerom struje kroz prekidač koji se isključuje. Mogu se izdvojiti dve različite vrste prekidanja, pri čemu se osnovna razlika između njih ogleda u smeru struje kroz kanal prekidača I_L u trenutku prekidanja, kao što je prikazano na Slici 3.



Slika 3. Vrste prekidanja za različit smer struje:
a) „pozitivan” smer struje; b) „inverzan” smer struje

Prva vrsta prekidanja prikazana je na Slici 3a i podrazumeva da je struja postojala u smeru od drejna ka sorsu prekidača u trenutku isključenja. Na Slici 3a dat je primer isključenja gornjeg prekidača u polumostu. Nakon isključenja provodnog prekidača struja prelazi na suprotni prekidač u polumostu. Ova vrsta isključenja u literaturi je poznatija kao tvrdo isključenje. Kako se struja ne može trenutno prekinuti, jednovremeno sa opisanim procesom suprotni prekidač označen brojem 2 na Slici 3 preuzima trenutnu jačinu struje i to kroz njegove parazitne kapacitivnosti, budući da smer struje to omogućava. Posle potpunog pražnjenja parazitne kapacitivnosti C_{ds} , prekidač 2 provodi struju putem inverznog mehanizma provođenja i taj proces traje dok ne istekne ostatak mrtvog vremena. Kada mrtvo vreme istekne, ovaj prekidač može biti uključen u uslovima nultog napona. Ova pojava naziva se meko uključivanje, budući da je protok struje opterećenja prirodno ispraznio parazitnu kapacitivnost C_{ds} , [1]. Zaključujemo da je prva vrsta prekidanja određena smerom struje od drejna ka sorsu prekidača koji se isključuje i karakteriše je sekvenca tvrdo isključenje – meko uključivanje.

Druga vrsta prekidanja (Slika 3b), podrazumeva da je struja kroz poluprovodnički uređaj koji se isključuje imala smer od sorsa ka drejnu, pri čemu struja posle isključenja nastavlja da prolazi kroz isti prekidač putem inverznog provođenja GaN prekidača. Ovakvo isključenje prekidača u literaturi je poznato kao meko isključenje. Bezgubitnim ili mekim procesom se smatra samo prelazak iz regularnog mehanizma provođenja u inverzni mehanizam provođenja, ali se nadalje kondukcion gubici povećavaju usled porasta napona v_{sd} . U ovom slučaju, kapacitivnost C_{ds} drugog prekidača nije ispražnjena tokom mrtvog vremena jer nema potrebne količine usmerenog naelektrisanja koje bi to omogućilo, kao u prvom slučaju. Uključenje prekidača koje sledi nakon isteka preostalog mrtvog vremena naziva se tvrdo uključivanje. Zaključujemo da je druga vrsta prekidanja određena smerom struje od sorsa ka drejnu prekidača koji se isključuje i karakteriše je sekvenca meko isključenje – tvrdo uključivanje.

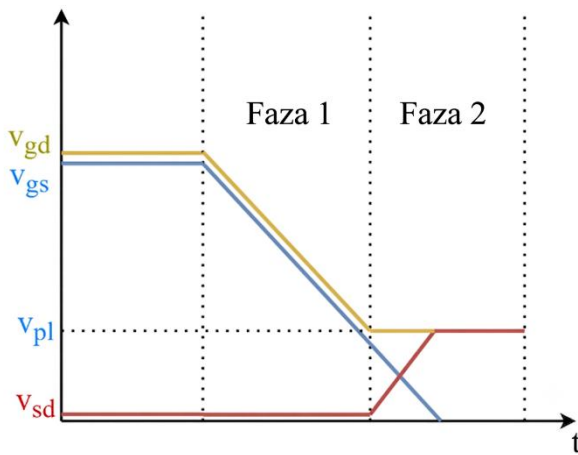
Obe vrste prekidačkog procesa date su na primeru isključenja gornjeg – uključivanja donjeg prekidača u polumostu, ali se bez gubitka opštosti mogu izvesti isti zaključci za suprotnu sekvencu, prateći smer struje kroz provodni prekidač.

Za oba slučaja razmatra se GaN model prikazan na Slici 2. Tokom prekidačkog procesa, prekidač radi u omskom režimu rada. U tom režimu, provodni kanal se može modelovati kao kontrolisani izvor struje I_{ch} , gde je vršna vrednost struje I_{ch} povezana sa naponom v_{gs} preko transkonduktanse g_m . Prilikom svih opisanih prekidačkih procesa pretpostavljeno je da se izlazna struja polumosta I_L ne menja i da ostaje konstantna tokom trajanja procesa prekidanja. U narednim odeljcima detaljno će biti opisan proces uključivanja, kao i isključenja prekidača snage.

Tokom treće faze provodni kanal prekidača je zatvoren, ali ukupna struja kroz prekidač je različita od nule i to sve dok se ne napune parazitne kapacitivnosti C_{ds} i C_{gd} . Jednačine navedene za drugu fazu i dalje važe s tim da je sada $I_{ch} = 0$.

2.2.2 Druga vrsta prekidanja – meko isključenje

Tokom druge vrste prekidanja (Slika 3b), aktivni prekidač se isključuje, ali celokupna struja nastavlja da protiče kroz njega procesom inverznog provođenja GaN prekidača. Ovaj proces predstavlja prelazak prekidača iz zasićenog režima rada u inverzni režim provođenja, prikazan je na Slici 7 i podeljen je u dve faze.



Slika 7. Druga vrsta prekidanja – meko isključenje

Do ove vrste prekidanja može doći samo ako je struja I_L negativna, to jest ako ima smer od sorsa ka drejnu provodnog prekidača (Slika 3b). Prilikom ove vrste prekidanja napon v_{sd} ne raste do napona v_{dc} već do napona inverznog provođenja GaN prekidača. Za uređaje male snage ovaj napon iznosi nekoliko volti.

Prva faza je identična kao kod prvog slučaja i njegove prve faze opisane u Potpoglavlju 2.2.1, tako da se napon v_{gs} menja po zakonu opisanom u jednačini (1). Napon v_{gd} tokom ove faze jednak je zbiru napona v_{gs} i v_{sd} . Pad napona na provodnom kanalu v_{sd} tokom ove faze je konstantan i jednak je proizvodu otpornosti provodnog kanala R_{ds_on} i struji kanala I_{ch} .

Druga faza počinje kada napon v_{gd} dostigne Milerov plato v_{pl} , to jest napon koji odgovara struji I_L na prenosnoj karakteristici datoj na Slici 3. Posle tog trenutka, napon v_{gd} ostaje konstantan. Napon v_{gs} nastavlja da se menja po jednačini (2). Pošto je napon v_{gd} konstantan a napon v_{gs} opada, pad napona na provodnom kanalu prekidača v_{sd} tokom ove faze će rasti i može se odrediti preko sledeće jednačine:

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

2.3 Uključenje prekidača

Prilikom uključenja prekidača snage ponovo se razlikuju dve vrste prekidanja – kada struja I_L ima pozitivan (od drejna ka sorsu) i kada ima inverzan (od sorsa ka drejnu) smer (Slika 2). Svaki od navedenih procesa je, slično analizi isključenja, podeljen na faze. Podela na faze

omogućava precizno razumevanje dinamike uređaja tokom prelaska iz isključenog u uključeno stanje, što će kasnije biti neophodno za tačnu procenu prekidačkih gubitaka i optimizaciju performansi.

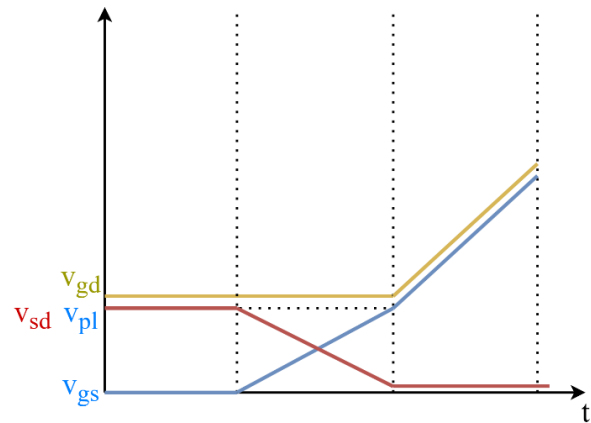
2.3.1 Prva vrsta prekidanja – meko uključenje

Tokom uključenja prekidača prilikom prve vrste prekidanja (Slika 3a), podrazumeva se da su njegove parazitne kapacitivnosti C_{ds} i C_{gd} ispražnjene (tokom isključenja suprotnog prekidača) i da kroz prekidač putem inverznog provođenja prolazi struja jačine I_L . Ovaj slučaj podeljen je u dve faze kao što je prikazano na Slici 8.

Tokom prve faze napon v_{gd} je konstantan i odgovara naponu Milerovog platoa za struju I_L , dok se napon v_{gs} povećava i to po jednačini:

$$v_{gs} = v_{dr_on} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_e C_{gs}}} \right) \quad (5)$$

U trenutku kada napon v_{gs} dostigne napon Milerovog platoa za struju I_L , inverzno provođenje GaN prekidača prestaje i sada je aktivna oblast u potpunosti provodna i dozvoljava prolazak struje u oba smera. Tokom druge faze napon v_{gs} nastavlja da raste po dinamici prikazanoj u (5) i dostiže vrednost v_{dr_on} .

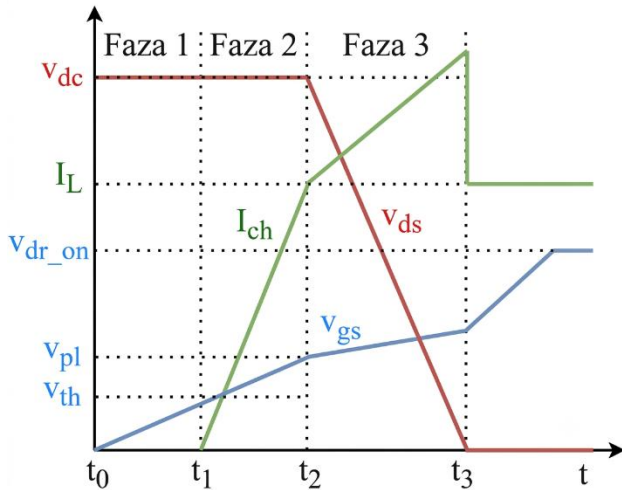


Slika 8. Prva vrsta prekidanja – meko uključenje

2.3.2 Druga vrsta prekidanja – tvrdo uključenje

Tokom uključenja prekidača prilikom druge vrste prekidanja, Slika 3b, parazitne kapacitivnosti C_{ds} i C_{gd} nisu prethodno ispražnjene, kao u prethodnom slučaju, tako da ih je potrebno ispražniti tokom prekidačkog procesa. Uključenje se u ovom slučaju odvija u tri faze, prikazane na Slici 9.

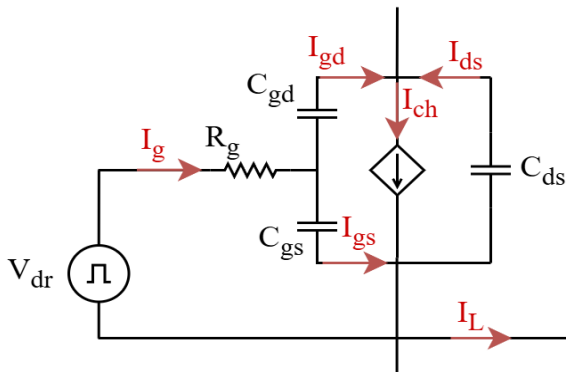
Tokom prve faze napon v_{gs} raste do napona praga provođenja prekidača v_{th} . I tokom prve i tokom druge faze napon v_{gs} se menja po jednačini (5). U trenutku kada struja kroz aktivnu oblast prekidača krene da raste počinje druga faza.



Slika 9. Druga vrsta prekidanja – tvrdo uključenje

Tokom druge faze napon v_{gs} raste od napona praga provođenja v_{th} do napona Milerovog platoa v_{pl} koji odgovara struji I_L , dok struja raste od nulte vrednosti do I_L . Veza između napona v_{gs} i struje I_L data je na Slici 2. Dok prekidač koji se uključuje ne preuzme svu struju sa prekidača koji je u inverznom mehanizmu provođenja, ne može da dođe do pada napona v_{ds} . Razlog zbog čega dolazi do ove pojave krije se u samom inverznom mehanizmu provođenja koji ne dozvoljava padu napona na svojoj aktivnoj oblasti da se menja dokle god postoji neka inverzna struja koja protiče kroz kanal.

Tokom treće faze, parazitne kapacitivnosti C_{ds} i C_{gd} se prazne i to strujom kroz aktivni kanal prekidača, kao što je prikazano na Slici 10.



Slika 10. Smerovi struja u modelu GaN prekidača prilikom druge vrste prekidačkog procesa – uključenje

Tokom ove faze dolazi do značajnog povećanja struje aktivne oblasti prekidača I_{ch} , tako da je i naprezanje koje poluprovodnik trpi značajno veće od napora ustaljenog radnog režima. Struja kroz aktivnu oblast I_{ch} i dalje je povezana sa naponom v_{gs} preko grafika datog na Slici 10.

Brzina promene napona v_{gs} sada je znatno usporena jer struja koju daje upaljač ne puni samo kapacitivnost C_{gs} već i prazni kapacitivnost C_{gd} . Promena napona v_{gs} data je, [7], pomoću:

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

dok se promena napona v_{ds} odvija po jednačini:

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

Rešavanjem sistema diferencijalnih jednačina (1) – (7) i uzimanjem u obzir da su vrednosti svih parazitnih kapacitivnosti funkcije napona na njima, dobijaju se vremenski oblici struje $I_{ch}(t)$ i napona $v_{ds}(t)$. Vremenski oblici struje $I_{ch}(t)$ i napona $v_{ds}(t)$ potrebni su kako bi se precizno odredili gubici na prekidačima.

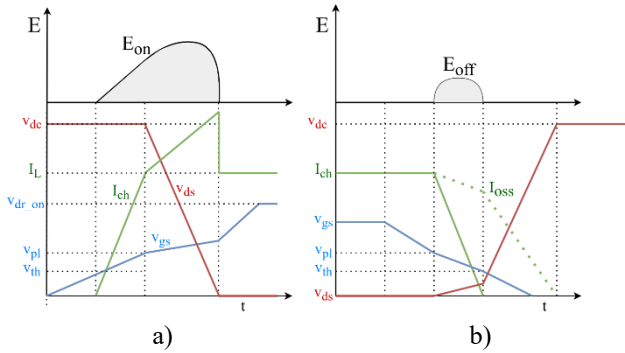
3. PRORAČUN GUBITAKA

Ključni pokazatelji performansi jednog pretvarača snage su efikasnost, veličina i cena. Efikasnost se može povećati odabirom GaN poluprovodničkih komponenti sa boljim statičkim i dinamičkim karakteristikama od konvencionalnih Si prekidača. Bolje dinamičke karakteristike omogućavaju rad na većim frekvencijama, što dovodi do smanjenja potrebnih dimenzija pasivnih komponenti kao što su transformatori, prigušnice i kondenzatori, [4]. Da bi se u potpunosti iskoristile prednosti GaN prekidača, neophodno je razviti pouzdan model za proračun gubitaka. Na osnovu takvog modela moguće je odrediti koji GaN prekidač je najpodobniji za konkretnu primenu, da li je potrebno dodatno hlađenje, koji tip hlađenja je adekvatan, kao i maksimalnu radnu učestanost prekidanja pretvarača. U ovom poglavlju biće razrađen model za ocenu gubitaka na osnovu prethodno izvedenih relacija i informacija sakupljenih iz tehničke dokumentacije prekidača.

Gubici u prekidačima tokom jednog prekidačkog ciklusa obuhvataju: gubitke pri uključanju, gubitke pri isključanju, gubitke u gejt petlji, gubitke tokom provođenja struje i gubitke usled mehanizma inverznog provođenja. Na Slici 11 prikazani su talasni oblici energije gubitaka pri tvrdom uključanju i isključanju prekidača. Bitno je uočiti da je preklapanje struje i napona značajno izraženije prilikom uključanja prekidača, zbog čega je i energija gubitaka pri uključanju veća nego pri isključanju. U određenim topologijama, u kojima se mogu realizovati dva prekidača prelaza prve vrste (Slika 3a), a koje karakteriše sekvenca mekog uključanja i tvrdog isključanja u okviru jedne periode prekidanja, moguće je u velikoj meri smanjiti ukupne prekidačke gubitke. U tom slučaju, tokom jedne periode dobijaju se dva meka uključanja i dva tvrda isključanja. Ovakva sekvenca je karakteristična za LLC rezonantne pretvarače, koji primenom GaN prekidača mogu postići veoma visoke efikasnosti u poređenju sa drugim izolovanim DC/DC topologijama. Iako je ovaj režim rada uobičajen za LLC pretvarače, moguće ga je realizovati i u sinhronom spuštaču napona, pod uslovima koji će biti detaljno razmotreni u Poglavlju 3.2.

Ukupni komutacioni i kondukциони gubici mogu se izraziti kao proizvod struje koja teče kroz provodni kanal prekidača i pada napona na njemu:

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



Slika 11. Energija gubitaka prilikom tvrdog a) uključenja b) isključenja

Da bi se ocenila snaga gubitaka na prekidaču, potrebno je odrediti vremenske talasne oblike veličina od značaja u funkciji radnih režima. Kako bi se odredili vremenski oblici struje kanala $I_{ch}(t)$ i pada napona na kanalu $v_{ds}(t)$, potrebno je rešiti sistem diferencijalnih jednačina kojim je rezultovalo Poglavlje 2. Da bi sistem jednačina (1) – (7) bio rešiv, potrebno je poznavati sledeće zavisnosti:

$I_{ch}(v_{gs})$ – zavisnost struje aktivne oblasti prekidača od napona v_{gs} ;

$I_{ch}(v_{gd})$ – zavisnost struje aktivne oblasti prekidača od napona v_{gd} prilikom inverznog provođenja struje;

$C_{ds}(v_{ds})$ – zavisnost kapacitivnosti drejn–sors od pada napona na aktivnoj oblasti prekidača v_{ds} ;

$C_{gd}(v_{gd})$ – zavisnost kapacitivnosti gejt–drejn od napona v_{gd} ;

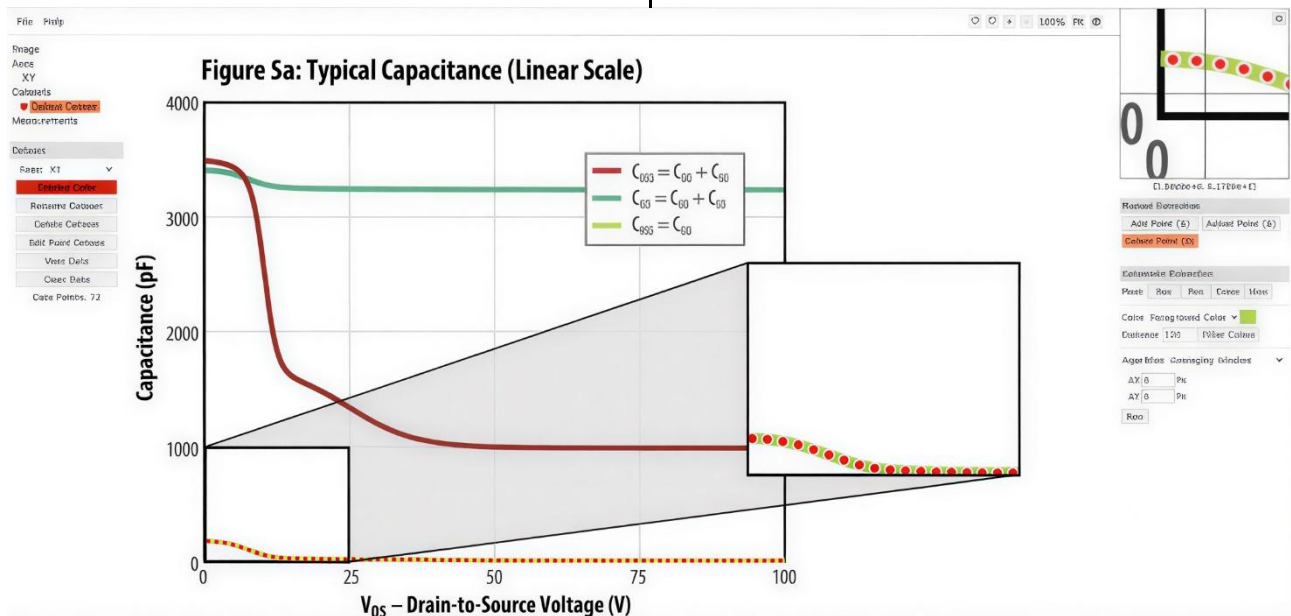
$C_{gs}(v_{gs})$ – zavisnost kapacitivnosti gejt–sors od napona v_{gs} .

Prethodno navedene zavisnosti mogu se precizno odrediti eksperimentalnim metodama, kao što je test dvostrukog uključenja (*Double-pulse test*). Međutim, ovaj pristup često nije praktičan jer podrazumeva nabavku komponente i sprovođenje svih merenja kako bi se proverila njena pogodnost za određenu primenu. Alternativni načini uključuju upotrebu aproksimacionih izraza, prilagođavanje krivih ili, u slučaju parazitnih kapacitivnosti, primenu modela zasnovanog na naelektrisanjima (*charge-based model*). Iako merenja zavisnosti predstavljaju najpouzdaniji izvor podataka, do njih se najteže dolazi, dok aproksimacione metode često dovode do značajnih odstupanja.

Zbog toga je u ovom radu primenjen drugačiji pristup. Na osnovu krivih datih u tehničkoj dokumentaciji prekidača, korišćenjem softverskog paketa *Automeris* određene su diskretne vrednosti traženih veličina. Iz ovih diskretnih zavisnosti i diferencnih jednačina dobijenih diskretizacijom izraza (1) – (7), moguće je odrediti talasne oblike $I_{ch}(t)$ i $v_{ds}(t)$.

3.1 Prikupljanje podataka iz tehničke dokumentacije

Podaci u tehničkoj dokumentaciji prekidača najčešće su predstavljeni u obliku grafika, koji su dobijeni na osnovu merenja koja je proizvođač sproveo i potom prikazao u tehničkoj dokumentaciji. Ukoliko proizvođač ne raspolaže tabelarnim vrednostima traženih zavisnosti ili nije voljan da ih podeli, neophodno je izvršiti izdvajanje podataka direktno sa grafika iz tehničke dokumentacije. U ovom radu taj postupak je realizovan korišćenjem softverskog paketa [8]. Primer korišćenja ovog alata dat je na Slici 12.



Slika 12. Korišćenje alata za izdvajanje podataka iz tehničke dokumentacije

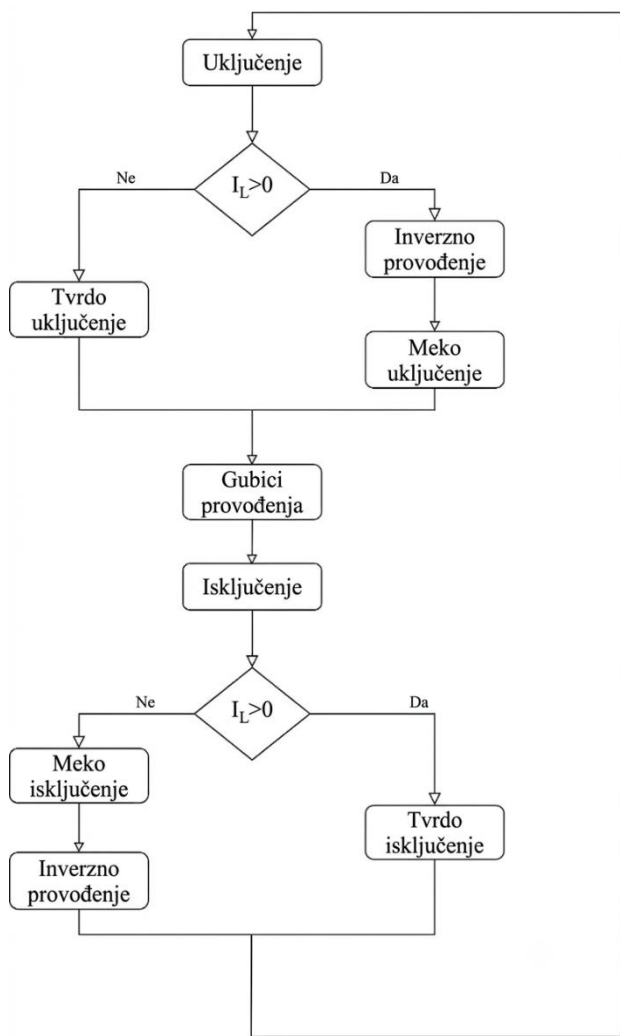
Ovaj softverski paket namenjen je digitalizaciji grafičkih podataka, odnosno izdvajanju numeričkih vrednosti sa slika grafika. Ovaj alat omogućava korisniku da na jednostavan način iz postojećih dijagrama dobije tabelarne podatke pogodne za dalju analizu i proračun. Slika prikazuje promenu parazitnih kapacitivnosti izvučenih

iz tehničke dokumentacije komercijalno dostupnog GaN prekidača u zavisnosti od napona drejn–sors v_{ds} . Softverski paket je korišćen da bi se u više od 100 tačaka procenile diskretne vrednosti kapacitivnosti, koje su označene crvenim tačkama, čime je obezbeđena visoka tačnost prikazane zavisnosti.

3.2 Algoritam za ocenu gubitaka

Na osnovu diferencijalnih jednačina izvedenih u Poglavlju 2 i podataka sakupljenih iz tehničke dokumentacije moguće je oceniti gubitke disipirane na prekidačima. Kako bi se odredilo radno stanje prekidača i vrsta prekidačkog procesa koja se realizuje, u svakom trenutku je potrebno poznavati struju polumosta I_L . Struja I_L ne zavisi direktno od vrste prekidača već od spoljnih parametara električnog kola kao što su napon jednosmernog kola i vrednosti pasivnih elemenata ili aktivnog opterećenja. Poznavanjem struje I_L na osnovu algoritma prikazanog na Slici 13 moguće je odrediti stanja kroz koja prolazi prekidač tokom jednog perioda prekidanja. Pod pozitivnim smerom struje smatra se struja koja ima smer od drejna ka sorsu, dok je negativan smer struje od sorsa ka drejnu.

Rezultat algoritma jesu diskretne vrednosti pada napona na provodnom kanalu $v_{ds}(k)$ i struje provodnog kanala $I_{ch}(k)$, te se gubici na tom prekidaču tokom jedne periode određuju na osnovu diskretizovane jednačine (9).



Slika 13. Stanja kroz koja prolazi jedan prekidač u polumostu tokom jednog ciklusa prekidanja

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

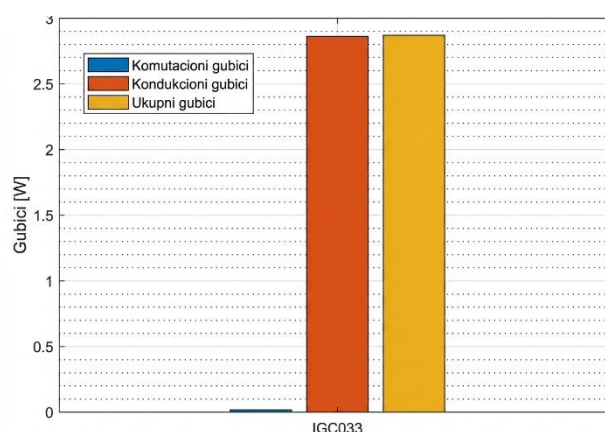
3.3 Ocena gubitaka

U ovom poglavlju izvršena je analiza i procena prekidačkih gubitaka za izabrani GaN prekidač u polumosnoj konfiguraciji. Gubici su određeni i međusobno upoređeni za dve različite vrednosti talasnosti struje, sa ciljem da se sagleda uticaj različitih sekvenci prekidačkih stanja na ukupnu disipaciju snage. U tu svrhu razvijena su skripta u programskom paketu [9], koja su omogućila rešavanje sistema diferencijalnih jednačina dobijenih diskretizacijom izraza (1) – (7) korišćenjem Ojlerove diskretizacione metode prvog reda. Stanja sistema su određena primenom algoritma prikazanog na Slici 13, čime je omogućeno proučavanje gubitaka prekidača u različitim radnim režimima pretvarača.

Procena gubitaka izvršena je pri sledećim uslovima. Snaga pretvarača određena je da bude $P = 1$ kW, ulazni napon je $V_{in} = 60$ V i faktor ispune $d = 0,75$, dok su ostali parametri od značaja dati u Tabeli I. Ukupni gubici na oba prekidača u polumosnoj konfiguraciji dati su na Slici 14, za slučaj kada je talasnost struje veća od njene srednje vrednosti.

Tabela I Parametri dizajniranog spuštača napona

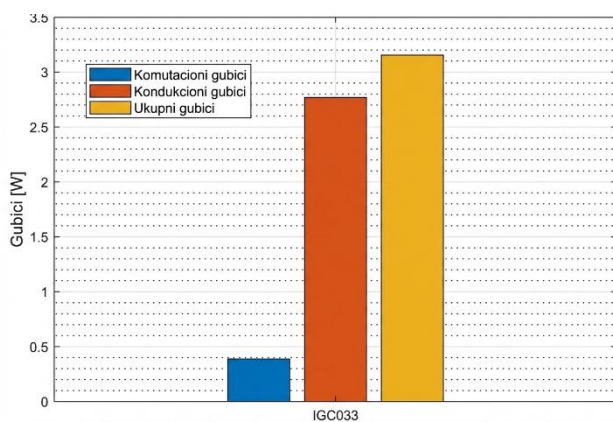
Parametar	Vrednost	Jedinica
Ulazni napon	10–72	V
Izlazni napon	5–70	V
Nominalna snaga	1	kW
Učestanost prekidanja	125	kHz
Mrtvo vreme	25	ns
Prigušnica	1,5	μH
Prekidač	GaN [10]	/
Upaljač	[11]	/



Slika 14. Ukupni gubici na oba prekidača u polumosnoj konfiguraciji

Sa grafika se odmah primećuje da su komutacioni gubici zanemarljivo mali u odnosu na kondukcione gubitke. U ovom radnom režimu izlazna struja je približno $I_L = 22$ A, dok je amplituda talasnosti struje, maksimalna devijacija u odnosu na srednju vrednost, 27 A. Zbog ovako velike talasnosti prilikom gašenja donjeg prekidača struja je negativna i iznosi $I_{L_min} = -5$ A. Tada se to isključenje odvija

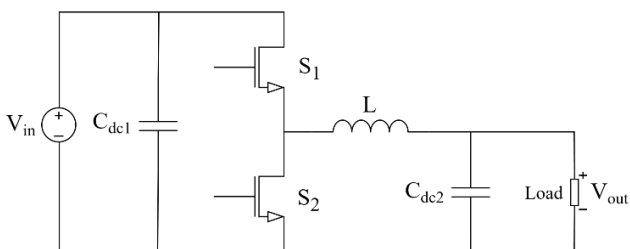
po scenariju opisanom u 2.2.1. Sa Slike 3 može se uočiti da je preklapanje struje $I_{ch}(t)$ i napona $v_{ds}(t)$ vrlo malo, te su i gubici definisani jednačinom (8) vrlo mali. Posle isključenja donjeg prekidača nastupa period mrtvog vremena i uključanje gornjeg prekidača. Uključenje gornjeg prekidača se odvija po scenariju opisanom u 2.3.1 i takođe stvara minimalne gubitke. Bitno je naglasiti da kada dođe do komutacije isključenje gornjeg – uključanje donjeg, ona se odvija ponovo po scenariju 2.2.1, pa 2.3.1 i rezultuje minimalnim komutacionim gubicima. Kombinacija komutacije 2.2.1 i 2.3.1 može se ostvariti dva puta tokom jedne periode samo ukoliko je struja prilikom uključanja gornjeg prekidača negativna, to jest ako je talasnost struje veća od struje potrošača I_L . Ukupni gubici na oba prekidača u slučaju kada je talasnost struje manja od struje potrošača I_L prikazani su na Slici 15. Gubici u ovom slučaju su za 10% sada veći.



Slika 15. Ukupni gubici na oba prekidača u polumosnoj konfiguraciji pri tvrdom komutovanju

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Kako bi se ispitao i verifikovao načinjeni analitički model, isprojektovan je pretvarač spuštač napona snage 1 kW (Slika 16). Prilikom projektovanja i izrade prototipa, rasporedu komponenata na štampanoj ploči posvećena je posebna pažnja kako bi se minimizirali parazitski elementi upaljačkog kola i njihov uticaj na prekidački proces. Ključni podaci koji opisuju prototip pretvarača dati su u Tabeli I. Validacija opisanog modela komutacija eksperimentalno je vršena na postavci datoj na Slici 17.

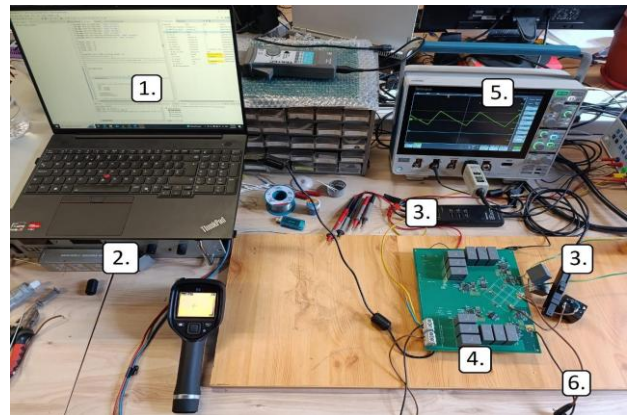


Slika 16. Topologija projektovanog spuštača snage

Postavku čine:

- (1) laptop za komunikaciju sa pretvaračem u realnom vremenu;
- (2) energetska napajanje;

- (3) naponske i strujne sonde propusnog opsega do 150 MHz;
- (4) razvijeni prototip pretvarača;
- (5) osciloskop;
- (6) pasivni potrošač otpornosti $R_L = 2 \Omega$.



Slika 17. Eksperimentalna postavka u Laboratoriji za digitalno upravljanje pretvaračima i pogonima Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Postoji više načina za verifikaciju komutacionog modela i algoritma za ocenu gubitaka. Jedan od pristupa je merenje ukupnih gubitaka na nivou celog pretvarača, nakon čega se vrši njihova raspodela na gubitke u bakarnim provodnicima, reaktivnim elementima i pomoćnoj elektronici. Oduzimanjem ovih komponenata od ukupne disipacije moguće je indirektno proceniti gubitke na prekidačima. Međutim, u dizajniranom pretvaraču prekidački gubici čine relativno mali udeo u ukupnim gubicima, što ovaj metod čini podložnim značajnim greškama i odstupanjima.

Zbog toga je primenjen drugi pristup – direktna procena tačnosti komutacionog modela kroz upoređivanje talasnih oblika napona $v_{ds}(t)$ i struje $I_{ch}(t)$. Kako su ove dve veličine usko povezane, dobro poklapanje talasnih oblika napona podrazumeva i dobro poklapanje struje, te samim tim i adekvatnu procenu prekidačkih gubitaka.

Izvršen je niz eksperimenata u kojima je ulazni napon menjan u opsegu od $V_{in} \in [10, 60] V$ sa korakom 10 V, dok je istovremeno faktor ispunje uzimao vrednosti od $d \in [0,25; 0,5; 0,75]$. Otpornost pasivnog potrošača fiksirana je tokom svih eksperimenata i iznosi 2Ω .

Ključni parametar za verifikaciju razvijenog modela je vreme trajanja komutacije. Trajanje komutacije ispitivano je na postavci prikazanoj na Slici 16 pri različitim radnim režimima i dalje poređeno sa rezultatima analitičko-numeričkog modela. Uz pomoć osciloskopa, izmereno je vreme potrebno naponu $v_{ds}(t)$ da se promeni sa 0 V na V_{dc} , prilikom isključenja donjeg prekidača (Slika 18).

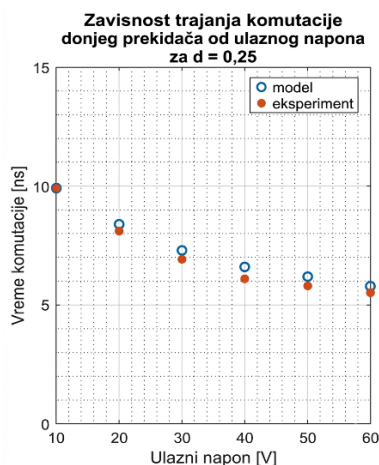
Izmerena su vremena trajanja komutacija za donji i gornji prekidač za šest različitih ulaznih napona. Eksperimentalni rezultati su upoređeni sa vremenima trajanja komutacija dobijenih iz modela u celom radnom opsegu napona pretvarača. Dobijeni rezultati predstavljeni su na Slici 19.

Sa Slike 19 može se zaključiti da razvijeni model prilično dobro prati eksperimentalne vrednosti, naročito u slučaju donjeg prekidača. Na naponu od 10 V model

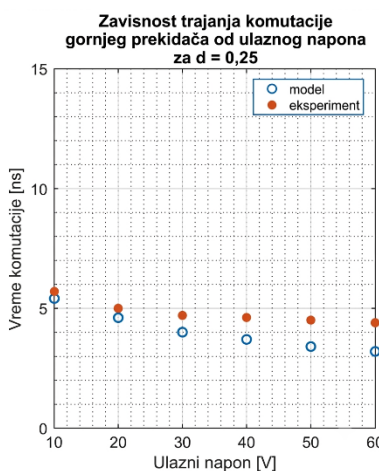
pokazuje gotovo idealno poklapanje sa merenjima, sa tačnošću od 99%. Međutim, kako se ulazni napon povećava, uočava se određeno odstupanje modela, pri čemu je najveća razlika uočena na 40 V, gde tačnost opada na 92%.



Slika 18. Promena napona v_{ds} prilikom isključenja donjeg prekidača



a)



b)

Slika 19. Zavisnost dužine trajanja komutacije od ulaznog napona: a) donjeg prekidača; b) gornjeg prekidača u polumostu

S druge strane, rezultati za gornji prekidač pokazuju nešto slabije poklapanje sa eksperimentom. Tačnost modela opada sa porastom ulaznog napona, dostižući 75% na 60 V. Ovo može ukazivati na dodatne nelinearne efekte ili asimetriju u uticaju parazitnih elemenata koji nisu u potpunosti obuhvaćeni trenutnim modelom. Uprkos odstupanjima, model pokazuje zadovoljavajuću tačnost, što ga čini korisnim alatom za procenu vremena komutacije i ocenu gubitaka na prekidačima.

5. ZAKLJUČAK

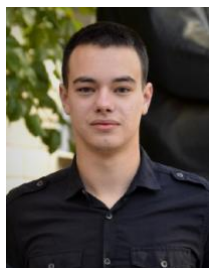
U radu su detaljno opisani procesi komutacija GaN prekidača u polumosnoj konfiguraciji. Izveden je fizički model komutacija čiji su izlazni parametri vremenski oblik struje kanala $I_{ch}(t)$ i vremenski oblik pada napona na kanalu $v_{ds}(t)$. Parametri od interesa opisani su u funkciji radnih režima. Kako bi izvedene jednačine bile rešive bez ikakvog uvođenja aproksimacija, uz pomoć odgovarajućeg softverskog paketa, izvučeni su relevantni podaci iz tehničke dokumentacije konkretnog prekidača. Tako izvučeni podaci iskorišćeni su prilikom diskretnog rešavanja jednačina prethodno opisanog fizičkog modela. Za potrebe verifikacije formiranog analitičko-numeričkog modela, razvijen je i ispitani prototip pretvarača spuštača napona zasnovan na GaN tehnologiji. Ispitivanja su sprovedena u celom opsegu radnog napona i poređena su trajanja vremena komutacije kojima rezultuju model i eksperimentalna postavka. Model pokazuje veoma dobro poklapanje od preko 92% sa eksperimentalnim ispitivanjima trajanja komutacije GaN prekidača. Najveća odstupanja između rezultata dobijenih analitičko-numeričkim modelom i eksperimentalno izmerenih vremena komutacije na prototipu dostižu do 25% za gornji prekidač, što ukazuje na prisustvo određenih efekata koji nisu u potpunosti obuhvaćeni modelom i ostavlja prostor za dalja istraživanja.

LITERATURA

- [1] Lidow A., De Rooij M., Glaser J., „GaN Power Devices for Efficient Power Conversion”, četvrto izdanje knjige, 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 [citirano 5. 1. 2026]. Dostupno na: <https://www.bdtic.com/datasheet/fairchild/AN-6005.pdf>.

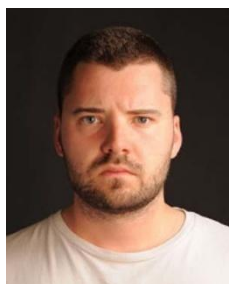
- [5] Huang X., Li Q., Liu Z., Lee F. C. „Analytical Loss Model of High Voltage GaN HEMT in Cascode Configuration” *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, CO, USA, 2013, pp. 3587-3594, DOI: 10.1109/ECCE.2013.6647173.
- [6] Erickson R., Maksimovic D., „Fundamentals of Power Electronics”, 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) [Softverski paket]. <https://www.mathworks.com>.
- [10] Infineon Technologies, „IGC033S101 Datasheet”, Rev. 1.0, 2025. [Poluprovodnička komponenta]. Dostupno na: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-igc033s101-datasheet-en.pdf>
- [11] Infineon Technologies, „2EDB8259F Datasheet”, Rev. 1.0, 2024. [Poluprovodnička komponenta]. Dostupno na: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-2edb8259y-datasheet-en.pdf>

BIOGRAFIJE



Miroslav Popović je rođen 2001. godine u Beogradu, u Srbiji. Diplomске i master studije završio je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2024. i 2025. godine, redom. Trenutno je na doktorskim studijama na istom fakultetu. Sa timom H-Bridges 2023. godine osvojio je drugo mesto na međunarodnom takmičenju IFEC (*International Future Energy Challenge*) u Hanoveru, u Nemačkoj. Oblasti njegovog istraživanja obuhvataju poluprovodnike velikog energetskeg procepa i dizajn pretvarača snage.

ORCID: 0009-0009-5388-8932



Aleksandar R. Milić je rođen u Smederevu, u Jugoslaviji, 1993. godine. Diplomu osnovnih i master akademskih studija iz elektrotehnike stekao je na Univerzitetu u Beogradu 2016. i 2017. godine, redom. Trenutno je zaposlen na Katedri za energetske pretvarače i pogone na Elektro-

tehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Njegova istraživačka interesovanja obuhvataju digitalno upravljanje električnim pogonima i mrežnim pretvaračima. Od 2017. do 2025. godine, kao mentor studentskog tima H-Bridges, dobio je šest nagrada na takmičenju IEEE-a *International Future Energy Challenge*.

ORCID: 0000-0003-2675-4292



Nikola Mirković je rođen u Beogradu, u Srbiji, 1997. godine. Diplomu osnovnih i master akademskih studija iz elektrotehnike stekao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2020. i 2021. godine, redom. Doktorat iz oblasti industrijske elektronike na *Centro de Electrónica Industrial, Universidad Politécnica de Madrid*, Madrid, Španija, odbranio je u aprilu 2025. godine. Od 2021. godine član je *Centro de Electrónica Industrial, Universidad Politécnica de Madrid* (UPM). Oblasti njegovog istraživanja obuhvataju induktivni prenos energije i pretvarače snage.

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

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

* Corresponding author: Miroslav Popovic

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

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.

Uroš N. Njegovan^{1,2}, Zoran N. Stojanović¹, Aleksandar D. Marjanović^{1,3}

Ograničenje sklopnih tranzijenata primenom tehnike kontrolisanog uključenja prekidača (Point-on-Wave)

¹ Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija*² Siemens Energy d. o. o. Beograd – Beograd, Srbija³ Siemens d. o. o. Beograd – Beograd, Srbija

Originalni naučno-istraživački rad

Ključne poruke

- Predstavljeni efekti sklopnih tranzijenata usled priključenja različitih vrsta opterećenja
- Opisana tehnika kontrolisanog uključenja prekidača
- Efekti primene tehnike testirani na simulatoru u realnom vremenu
- Izvršeno poređenje sa konvencionalnim uključenjem prekidača kompenzacione prigušnice

Kratak sadržaj

Podopterećena prenosna mreža, odnosno vodovi opterećeni ispod svoje prirodne snage, značajan su izvor reaktivne snage sa posledicom lokalnog povećanja napona. Kao sredstvo regulacije naponskih prilika operatorima prenosnog sistema širom sveta nametnula se upotreba paralelno priključene prigušnice (engl. Shunt Reactor) u kombinaciji sa konvencionalnim visokonaponskim prekidačem. Implementacija ovakvog rešenja dovodi do značajnog porasta broja sklopnih tranzijenata. Primenom tehnike kontrolisanih operacija prekidača (Point-on-Wave), kroz pojedinačno uključenje/isključenje svakog pola prekidača u najpovoljnijem trenutku, u velikoj meri se mogu ograničiti vrednosti udarne struje uključenja prigušnice i povratnog napona pri isključenju. U radu su predstavljeni negativni efekti nekontrolisanog priključenja paralelnih prigušnica na prenosni sistem. Opisana je tehnika kontrole trenutka uključenja prekidača kao mera ograničavanja negativnih uticaja sklopnih tranzijenata. Funkcija kontrole prekidača i potencijalni efekti primene u prenosnoj mreži su testirani u laboratorijskim uslovima. Laboratorijska postavka se sastoji od mikroprocesorskog uređaja za zaštitu i upravljanje kao kontrolera i simulatora u realnom vremenu (HIL – Hardware-in-the-Loop) na kome je realizovan model 400 kV paralelne prigušnice i prekidača. Uređaji komuniciraju korišćenjem IEC 61850 Sampled Values i GOOSE protokola. Dobijeni rezultati potvrđuju skoro potpunu eliminaciju udarnog perioda prilikom uključenja kompenzacione prigušnice.

Ključne reči

Kompenzaciona prigušnica, kontrolisano uključenje prekidača, simulacija *Hardware-in-the-Loop*, udarna struja prigušnice

Primljeno: 26. decembar 2025. Recenzirano: 19. mart 2026.

Izmenjeno: 6. maj 2026. Odobreno: 12. maj 2026.

*Korespondirajući autor: Uroš N. Njegovan, +381 60/81-70-242

Imejl: uros.njegovan@siemens-energy.com

Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Primena tehnike kontrolisanog uključenja prekidača (Point on Wave) na primeru kompenzacione prigušnice 400 kV u mreži” (<https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/cigre37-b5-08/>), nagrađenog u Studijskom komitetu STK-B5 Zaštita i automatizacija, na 37. Savetovanju CIGRE Srbija, Zlatibor, 26-30. maja 2025.

1. UVOD

Sklopni tranzijenti predstavljaju jedan od glavnih uzroka prekomernog naprežanja opreme elektroenergetskog sistema (EES). Na primer, uključenje kompenzacione prigušnice može dovesti do izobličenja talasnih oblika napona i pojave udarnih struja velike amplitude, dok uključenje kondenzatorskih baterija može biti praćeno prekomernim povećanjem napona. Tehnika kontrolisanog uključanja/isključanja prekidača primenjuje se u cilju ograničavanja i eliminacije sklopnih tranzijenata koji su posledica uključanja ili isključanja kompenzacionih prigušnica, energetskih transformatora i kondenzatorskih baterija. Pomenuta tehnika poslednjih godina beleži porast primene na nadzemnim i kablovskim vodovima visokog napona.

Kombinacija visokonaponskih (VN) prekidača sa stabilnim operativnim karakteristikama i savremenih mikroprocesorskih uređaja dovela je do usavršavanja algoritama kontrolera prekidača, pojednostavila njihovu integraciju u primarnim i sekundarnim kolima i omogućila primenu na različitim vrstama opterećenja. Usled značajnog porasta njene primene prethodnih godina postala je prepoznata kao pouzdano sredstvo ograničenja efekata sklopnih tranzijenata.

Kontroler optimizuje trenutak operacije VN prekidača uvođenjem odgovarajućeg kašnjenja izvršenja komande u zavisnosti od vrste opterećenja. Na taj način, teži se ograničenju negativnih uticaja sklopnih operacija u EES-u. Osnovne prednosti primene modernih kontrolera su, [1]:

- povećanje pouzdanosti EES-a kao rezultat ograničenja varijacije napona i redukcije viših harmonika;
- poboljšanje kvaliteta električne energije;
- produžetak životnog veka opreme;
- ograničenje amplitude prenapona i udarne struje magnećenja.

1.1 Uključenje prekidača kompenzacione prigušnice

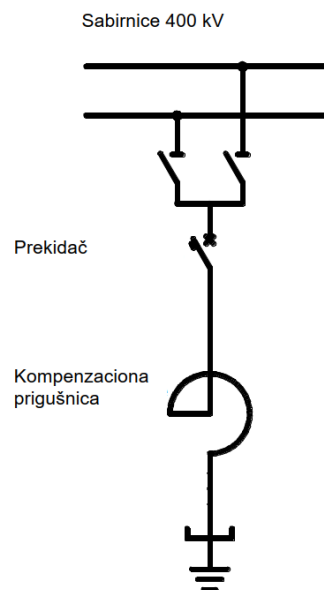
Naponi potrošačkih čvorova, zajedno sa frekvencijom i stepenom harmonijskih izobličenja, predstavljaju osnovne pokazatelje kvaliteta električne energije. Kod podopterećenih prenosnih mreža do izražaja dolaze kapacitivnosti dugačkih visokonaponskih vodova koji postaju značajan izvor reaktivne snage sa posledicom lokalnog povećanja napona iznad maksimalno dozvoljenih vrednosti. Podopterećeni 400 kV i 220 kV vodovi česta su pojava kako u Srbiji tako i u regionu.

Posmatrano sa aspekta EES-a u celini, naponske prilike su lokalnog karaktera, pa se u velikom broju slučajeva ne mogu regulisati sistemski, odnosno bez upotrebe dodatnih kompenzacionih elemenata. Trenutno postoji širok spektar dostupnih tehnologija kompenzacije reaktivne snage, kao što su sinhroni kompenzatori, kompenzacione prigušnice (*Shunt Reactor*), statički VAR kompenzatori (SVC), statički sinhroni kompenzatori (STATCOM), kombinovani serijsko-paralelni FACTS kontroleri UPFC (Unified Power Flow Controller) i IPFC

(Interline Power Flow Controller), kao i FACTS kontroleri kombinovani sa transformatorima, poput TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer) i TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulator).

Paralelno priključena kompenzaciona prigušnica predstavlja jedno od najzastupljenijih sredstava kompenzacije reaktivne snage koje danas primenjuju operatori prenosnog sistema širom sveta. Koristi se u pojedinim čvorištima mreže kako bi se održao željeni naponski profil u EES-u. Grade se kao monofazne ili trofazne jedinice sa regulacionim otcepima ili bez regulacionih otcepa (neupravljive). Na mrežu se priključuju ili direktno na sabirnice VN postrojenja preko konvencionalnih prekidača (Slika 1) ili preko tercijera mrežnih transformatora.

U periodima visokih opterećenja u EES-u i povećanog prenosa električne energije visokonaponskim vodovima prigušnice je najčešće potrebno odvojiti sa mreže. U zavisnosti od varijacija napona i učestalosti sklopnih operacija VN prekidača kompenzacione prigušnice, može doći do značajnog porasta broja sklopnih tranzijenata na mestu njenog priključenja. Ovakvi tranzijenti predstavljaju jedan od glavnih uzroka prekomernog naprežanja opreme prenosnog sistema, pre svega prekidača, dok dodatno imaju negativan uticaj na kvalitet električne energije i mogu dovesti do nepotrebnih reagovanja uređaja relejne zaštite.

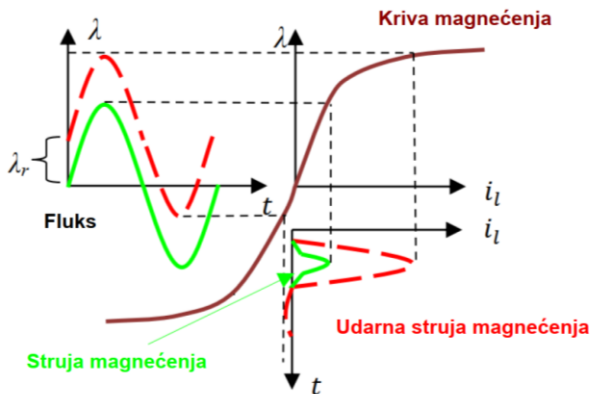


Slika 1. Direktno priključenje kompenzacione prigušnice na sabirnice postrojenja VN

1.2 Uključenje prekidača energetskog transformatora

Energetski transformatori igraju jednu od ključnih uloga u pouzdanom radu EES-a. Usled značajnog porasta zahteva za besprekidnom isporukom električne energije prethodnih decenija postavljeni su visoki kriterijumi pouzdanosti rada energetskih transformatora (u daljem tekstu transformator).

Udarne struja magnećenja transformatora (Slika 2), [2], pojava je koja nastaje prilikom uključanja neopterećenog transformatora. U određenim slučajevima ona može dostići vrednosti bliske struji kvara, [3]. Njen uticaj je manje izražen u poređenju sa strujom kvara, ali učestalost njene pojave i dužina trajanja mogu imati negativan uticaj na životni vek VN opreme. Osim velike amplitude udarne struje, uključanje transformatora može biti praćeno pojavom viših harmonika, ima negativan uticaj na kvalitet električne energije i može dovesti do nepotrebnih reagovanja uređaja relejne zaštite.



Slika 2. Struja magnećenja energetskog transformatora

U ustaljenom radnom režimu transformatora u praznom hodu sav fluks se zatvara u njegovom magnetskom jezgri, stoga je potrebna mala struja magnećenja, kao što je prikazano na Slici 2. Ona tipično iznosi 1-2% nazivne struje transformatora. Iz ekonomskih razloga, transformatori se konstruišu tako da vrednost radnog fluksa odgovara tački bliskoj kolenu karakteristike magnećenja. Konvencionalno uključanje prekidača transformatora u nasumičnom trenutku može dovesti do nesimetričnog magnetskog fluksa i zasićenja jezgra. Važno je napomenuti da se prilikom isključenja transformatora u njegovom magnetskom jezgri zadržava deo fluksa, poznat kao remanenti, odnosno zaostali fluks (λ_r). On može imati uticaj na amplitudu udarne struje magnećenja prilikom narednog uključanja transformatora u zavisnosti od vrednosti napona u trenutku uključanja. S obzirom na to da transformatori predstavljaju važan element EES-a i da prekid njihovog rada može biti kritičan u trenucima visokog opterećenja EES-a, značajan korak ka mogućem produženju životnog veka može se postići kontrolisanjem trenutka njihovog uključanja.

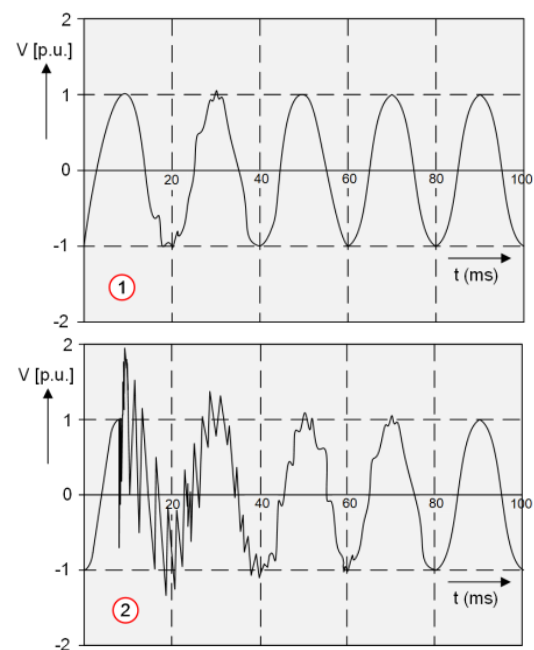
1.3 Uključenje prekidača kondenzatorskih baterija

Kada se prekidač kondenzatorskih baterija ili harmonijskog filtera isključi, potrebno je određeno vreme da se zaostala energija akumulirana u bateriji isprazni. Kako bi se izbeglo ponovno uključanje prekidača pre potpunog pražnjenja baterije, obično se primenjuje vremenski relej sa ciljem da određeni vremenski period blokira mehanizam prekidača. Ugrađeni otpornici za

pražnjenje će osigurati da se baterija isprazni pre nego što istekne vreme blokade prekidača. Tipično podešenje vremenskog releja iznosi 10 minuta od trenutka isključenja prekidača do prvog narednog dozvoljenog uključanja.

Ispražnjene kondenzatorske baterije kratkotrajno predstavljaju kratak spoj u trenutku uspostavljanja napona na njihovim priključcima, odnosno uključanja prekidača. Ukoliko do uključanja dođe prilikom maksimalne vrednosti napona, varijacije napona i struje mogu biti značajne. U zavisnosti od konfiguracije mreže, prenaponi koji mogu nastati prilikom uključanja kondenzatorskih baterija mogu dovesti do oštećenja, pa čak i proboja izolacije pojedinih elemenata elektroenergetskog sistema, kao što su transformatori, izolatori, kablovi i dr. Kod određene konfiguracije kondenzatorskih baterija uključanje može biti praćeno strujama visoke amplitude i frekvencije. U ekstremnim slučajevima to može ugroziti mehanički integritet kako kondenzatorske baterije tako i prekidača.

Pomenuti tranzijenti se mogu značajno ograničiti kontrolisanjem prekidača kondenzatorskih baterija tako da do uključanja dođe pri nultom naponu (Slika 3), [4].



Slika 3. Talasni oblik napona kontrolisanog (gore) i nekontrolisanog (dole) uključanja kondenzatorskih baterija

2. TEHNIKA KONTROLE TRENTUTKA UKLJUČENJA PREKIDAČA

Jedna od najzastupljenijih tehnologija kontrole prekidača zasnovana je na odabiru optimalnog trenutka na naponskom talasu (*Point-on-Wave*). Ovakvim uključanjem značajno se mogu redukovati neželjeni efekti sklopnih tranzijenata koji mogu nastati u slučaju konvencionalnog uključanja u nasumičnom trenutku. Algoritam koji određuje najpovoljniji trenutak uključanja svake od faza na osnovu ulaznih veličina implementiran je u kontroleru

prekidača, koji je po svojim karakteristikama sličan savremenim mikroprocesorskim uređajima za relejni zaštitu i upravljanje.

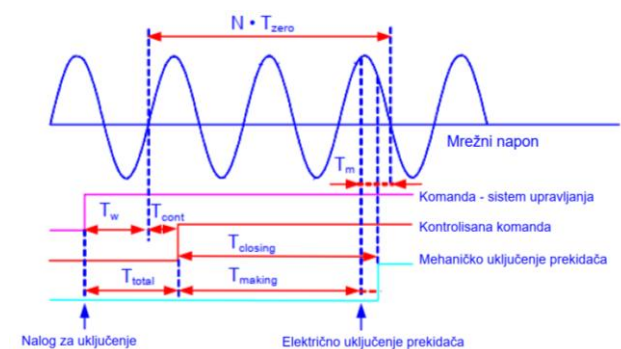
Njegova uloga se ogleda u tome da nakon prijema naloga za uključanje prekidača proceni optimalan trenutak uključanja na osnovu merenog naponskog talasa i shodno tome izračuna potrebno vremensko kašnjenje izvršenja komande kako bi se svaki pol prekidača nezavisno uključio u optimalnom trenutku. Očekivana ponovljivost kontrolera i preciznost uspostavljanja struje u odnosu na optimalnu tačku na naponskom talasu je ± 1 ms. Algoritam kontrolera proverava sva odstupanja u frekvenciji referentnog napona detekcijom prolaska signala napona kroz nulu (*zero crossing*) i na osnovu toga donosi konačnu odluku o trenutku izvršenja komande.

Princip kontrolisanog uključanja sa svim ključnim vremenskim trenucima od interesa prikazan je na Slici 4, [5]. Može se uočiti da, pre uspostavljanja mehaničkog kontakta polova prekidača, odnosno njegovog mehaničkog uključanja, dolazi do dielektričnog proboja izolacionog medijuma kada se kontakti prekidača dovoljno približe i uspostavlja se električni luk. To predstavlja električni kontakt polova, odnosno električno uključanje prekidača. Vreme mehaničkog uključanja ($T_{CLOSING}$) karakteristika je prekidača i može se izmeriti. Vreme paljenja luka (T_m) predstavlja ulazni parametar kontrolera na osnovu koga se izračunava ukupno vreme koje je potrebno da prođe od trenutka izdavanja komande do uspostavljanja struje, odnosno električnog uključanja prekidača (T_{MAKING}).

Ukupno vremensko kašnjenje koje kontroler unosi od momenta detekcije naloga za uključanje do izvršenja komande (T_{total}) predstavlja zbir vremena detekcije prolaska signala napona kroz nulu (T_W) i sinhronog kašnjenja koje računa kontroler (T_{cont}). Sinhrono vremensko kašnjenje se uvodi sa ciljem uspostavljanja struje u optimalnom trenutku u odnosu na naponski talas, odnosno uzima se u obzir računato vreme električnog uključanja prekidača (T_{MAKING}).

Stoga, uloga kontrolera je iniciranje uspostavljanja električnog a ne mehaničkog kontakta polova prekidača u optimalnom trenutku, koje se računa kao (1):

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



Slika 4. Ključni vremenski trenuci kontrolisanog uključanja prekidača

Veliki uticaj na efekat kontrolisanog uključanja imaju doslednost mehaničkih performansi prekidača i njegove dielektrične karakteristike. Pored toga, značajan faktor predstavlja i sposobnost kontrolera da precizno predvidi ponašanje prekidača tokom njegovog radnog veka.

Potrebne karakteristike prekidača za primenu u šemama kontrolisanog uključanja su:

- nezavisno upravljanje polovima;
- stabilno vreme uključanja uz mehaničku pouzdanost;
- izvanredne dielektrične osobine, tj. strma stopa opadanja dielektrične čvrstoće (RDDS).

Naime, operativna vremena prekidača značajno variraju zavisno od tipa prekidača, kao i radnih i ambijentalnih uslova. Deo ukupne varijacije vremena prekidača se može predvideti. Osim predvidljivih, postoje i varijacije koje nije moguće predvideti, jer su čisto statističke prirode. Operativno vreme prekidača se može predstaviti sledećim izrazom (2):

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

gde je:

- T_{Oper} – operativno vreme prekidača;
- T_{Nom} – nazivno vreme prekidača pri nominalnim uslovima;
- ΔT_{Comp} – predvidljivo odstupanje koje kontroler može kompenzovati;
- ΔT_{Drift} – odstupanje usled eksploatacije prekidača tokom njegovog radnog veka;
- $\Delta T_{Statistic}$ – statističko odstupanje.

Dakle, postoji varijabilni deo operativnog vremena prekidača koji se može predvideti i uvažiti u samom kontroleru (ΔT_{Comp}). Promena operativnog vremena prekidača uzrokovana je promenama vrednosti kontrolnog napona i ambijentalne temperature, a u slučaju pneumatskih prekidača, i promenom pritiska. Stoga se ove varijacije mogu predvideti, a na osnovu veličina izmerenih putem senzora i dostavljenih kontroleru moguće je kompenzovati njihov uticaj na operativno vreme prekidača.

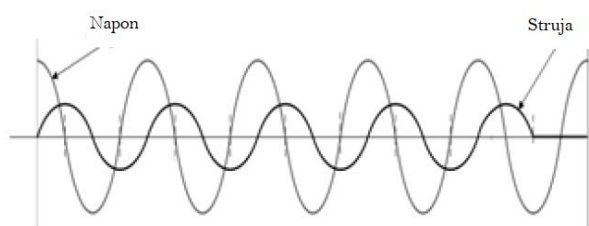
3. STRATEGIJA KONTROLISANOG UKLJUČENJA U ZAVISNOSTI OD OPTEREĆENJA

U narednim poglavljima dat je pregled strategija kontrolisanog uključanja prekidača za tri osnovna tipa opterećenja. U zavisnosti od očekivanja korisnika i dostupnih funkcionalnosti kontrolera, moguće je konfigurisati ga za neki od standardnih tipova opterećenja i, ukoliko je potrebno, za oba smera rada – uključanje i isključenje.

3.1 Kontrolisano uključenje prekidača kompenzacione prigušnice

U slučaju idealne kompenzacione prigušnice talasni oblik struje zaostaje približno 90° u odnosu na napon na njenim priključcima, [6]. Na taj način trenutna vrednost napona dostiže maksimum u trenutku prolaska struja kroz nulu, kao što je prikazano na Slici 5.

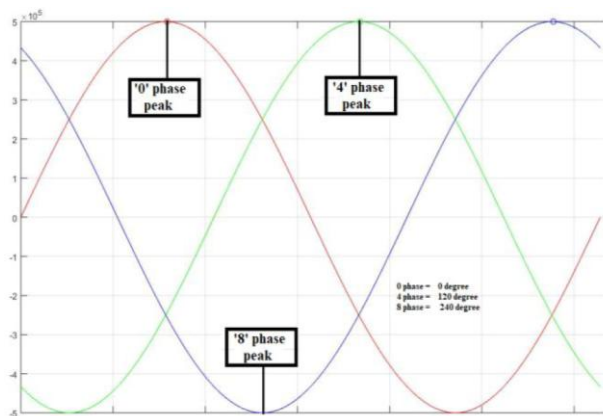
Amplituda udarne struje prigušnice i stepen izobličenja naponskog talasa zavise od vrednosti napona mreže u trenutku izdavanja naloga za uključanja i operativnog vremena prekidača.



Slika 5. Talasni oblik struje i napona kompenzacione prigušnice

Konvencionalno uključenje kompenzacione prigušnice u nasumičnom trenutku dovodi do pojave nesimetričnih struja, povećanja elektromehaničkih naprežanja prekidača i namotaja prigušnice, dok u ekstremnim slučajevima može dovesti do zasićenja strujnih transformatora i nepotrebnog reagovanja zemljospojne zaštite (50N/51N), koja je zasnovana na merenju struje provodnika neutralne tačke prigušnice. Ukoliko do uključanja dođe u trenutku kada je vrednost napona u jednoj od faza bliska nuli, sklopni tranzijent će biti najizraženiji.

U slučaju trofaznih sistema maksimumi vrednosti signala faznih napona su uvek inverznog redosleda (L1-L3-L2) u odnosu na fazni redosled napona mreže (L1-L2-L3) i međusobno pomereni za trećinu periode, odnosno 6,66 ms kod sistema nazivne frekvencije 50 Hz (Slika 6).



Slika 6. Talasni oblik tri fazna napona i njihovi maksimumi

Optimalna strategija uključanja prigušnice se zasniva na uključanju svakog pola prekidača pri maksimalnoj vrednosti napona. Pošto je prigušnica induktivan element, prilikom uključanja prekidača pri maksimalnoj vrednosti napona nivo magnetskog fluksa je teorijski minimalan, pa se samim tim ograničava i vrednost udarne struje. Referentni trenutak je prolazak talasnog oblika napona faze L1 kroz nulu (*zero crossing*). Cilj kontrolera je da obezbedi uključanje pola L1 sa faznim pomerajem od 90° u odnosu na referentni trenutak, odnosno u momentu kada vrednost napona faze L1 dostigne svoj maksimum [7].

Svoj maksimum (sa negativnim predznakom) sledeća dostiže faza L3 za $90^\circ + 60^\circ = 150^\circ$ odnosno sa kašnjenjem od 3,33 ms u odnosu na fazu L1. Poslednji korak je uključanje faze L2, i to sa teorijskom zadržkom od $90^\circ + 120^\circ = 210^\circ$, odnosno 6,66 ms.

Važno je napomenuti, iako nije predmet ovog rada, da isključenje prekidača prigušnice takođe može predstavljati izazov. Uzrok tome nije amplituda struje koja se prekida već energija akumulirana u prigušnici. „Odsecanje” struje pre njenog prolaska kroz nulu može dovesti do izraženih visokofrekventnih oscilacija uzrokovanih energijom akumuliranom u prigušnici kao induktivnom elementu, kao i parazitnih kapacitivnosti.

Nagli porast povratnog napona na kontaktima prekidača može dovesti do ponovnog paljenja luka. Neophodno je istaći da su savremeni SF₆ prekidači konstruisani tako da je verovatnoća „odsecanja” struje minimalna.

Uloga kontrolera prilikom isključenja prekidača prigušnice ogleda se u iniciranju mehaničkog odvajanja kontakata neposredno nakon prolaska struje kroz nulu. Nakon mehaničkog odvajanja kontakata prekidača, dolazi do razvlačenja luka i struja nastavlja da teče sve dok dielektrična čvrstoća ne bude dovoljna da prilikom narednog prolaska struje kroz nulu uguši luk. Kada se luk ugasi, trebalo bi da kontakti prekidača budu dovoljno udaljeni jedan od drugog da dielektrična čvrstoća nadjača povratni napon i ne dođe do ponovnog paljenja luka.

3.2 Kontrolisano uključenje prekidača energetskog transformatora

Kod trofaznih transformatora koji su formirani od tri monofazne jedinice ne postoji magnetska sprega između faza jednog namotaja, pa se sa aspekta strategije uključanja mogu posmatrati kao kompenzacione prigušnice, odnosno teži se uključanju svake faze pri maksimumu odgovarajućeg napona.

Na našim prostorima preovladavaju trofazni transformatori sa zajedničkim magnetskim jezgrom i kućištem, kod kojih primarni i sekundarni namotaj mogu biti spregnuti u zvezdu (uzemljena ili izolovana neutralna tačka) ili trougao. U pojedinim slučajevima transformatori sadrže i tercijerni namotaj. Ukoliko transformator poseduje tercijer ili je konstruisan kao trofazna jedinica sa zajedničkim jezgrom, tada postoji magnetska sprega između njegovih faza, što se odražava i na strategiju njegovog optimalnog uključanja.

U Tabeli I dat je pregled optimalnih trenutaka uključanja pojedinačnih faza prekidača transformatora u zavisnosti od sprege i načina uzemljenja neutralne tačke primarnog namotaja. Željeni trenutak uključanja prikazan je u formi faznog stava (ugla) svake od pojedinačnih faza u odnosu na referentni trenutak, odnosno prolazak signala napona faze L1 kroz nulu. Strategija uključanja podrazumeva energizaciju namotaja koji je prvi naveden u tabeli.

Opisana tehnika uključanja zasnovana je na merenju referentnog napona i ne uzima u obzir remanentni fluks transformatora.

Tabela I Optimalan trenutak uključanja u zavisnosti od sprege transformatora

Sprega transformatora	Faza L1 [°]	Faza L2 [°]	Faza L3 [°]
YNd; YNyn	90	180	180
Yd; Yy; Dd; Dyn; Dy	60	60	150

3.2.1 Transformator sa uzemljenom neutralnom tačkom (YNd; YNyn). U nastavku je opisana strategija uključanja transformatora čiji je namotaj koji se energizuje spregnut u zvezdu, sa uzemljenom neutralnom tačkom. Pri takvoj konfiguraciji, prvo se uključuje faza L1 i to pri maksimalnoj vrednosti njenog napona, kada je nivo fluksa najmanji. U pomenutoj fazi se uspostavlja struja magnećenja koja se zatvara preko uzemljenja neutralne tačke namotaja. Struja magnećenja u fazi L1 dovodi do indukcije simetričnog fluksa u preostalim fazama (L2 i L3), čija je vrednost jednaka polovini vrednosti fluksa faze L1 i suprotnog je polariteta. Zbog toga uspostavljena struja magnećenja u fazi L1 ima 1,5 puta veću vrednost od struje magnećenja u ustaljenom režimu kada su sve tri faze uključene.

Preostale dve faze potrebno je uključiti istovremeno sa pomerajem od 90° u odnosu na prvu. To je trenutak kada magnetski fluks faze L1 dostiže maksimalnu vrednost, a fluks indukovan u fazama L2 i L3 dostiže vrednosti potencijalnog fluksa koji bi u njima prouzrokovao mrežni napon u datom trenutku. Iako se uključanje faza L2 i L3 ne ostvaruje pri maksimumu odgovarajućih mrežnih napona, trenutak uključanja odgovara maksimumu magnetskog fluksa koji u tim fazama indukuje faza L1.

3.2.2 Transformator sa izolovanom neutralnom tačkom (Yd; Yy; Dd; Dyn; Dy). U slučaju transformatora sa izolovanom neutralnom tačkom, uključanjem samo jedne faze ne može se uspostaviti struja magnećenja zbog izolovane neutralne tačke ili sprege namotaja u trougao (D). Stoga se faze L1 i L2 uključuju istovremeno, pri maksimalnoj vrednosti međufaznog napona U_{L1-L2} , odnosno sa pomerajem od 60° u odnosu na referentni trenutak (prolazak napona faze L1 kroz nulu). U trenutku uključanja amplituda fluksa faza L1 i L2 jednaka je nuli. Napon faze L3 dostiže svoj maksimum sa kašnjenjem od 90° ($60° + 90° = 150°$ u odnosu na referentni trenutak). Njenim uključanjem u ovom trenutku postiže se uključanje pri minimalnom fluksu.

3.3 Kontrolisano uključanje prekidača kondenzatorske baterije

Kada se na ispražnjenu kondenzatorsku bateriju, kao element male impedanse, dovede napon u trenutku njegove maksimalne vrednosti, dolazi do izraženog prelaznog procesa u vidu prenapona i udarnih struja visoke amplitude.

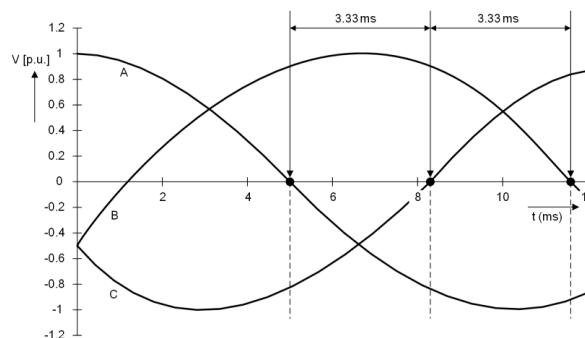
Da bi se postigla najmanja razlika potencijala prilikom kontrolisanog uključanja, ono se treba obaviti što bliže prolasku napona svake od faza kroz nulu. U Tabeli II dat je prikaz optimalnih trenutaka uključanja pojedinačnih faza prekidača u zavisnosti od načina uzemljenja neutralne tačke kondenzatorskih baterija.

Tabela II Optimalan trenutak uključanja u zavisnosti od načina uzemljenja kondenzatorskih baterija

Neutralna tačka kondenzatorske baterije	Faza L1 [°]	Faza L2 [°]	Faza L3 [°]
Uzemljena	0	120	60
Izolovana	180	90	90

3.3.1 Kondenzatorska baterija sa uzemljenom neutralnom tačkom. U slučaju kondenzatorskih baterija sa uzemljenom neutralnom tačkom svaka faza se uključuje nezavisno, pri prolasku njenog napona kroz nulu (Slika 7). Trenuci prolaska talasnih oblika napona kroz nulu međusobno su pomereni za 60°.

Redosled uključanja polova prekidača prikazan na Slici 7 je L1-L2-L3, sa vremenskim pomerajem od 3,33 ms za 50 Hz, odnosno 2,77 ms za 60 Hz sisteme.



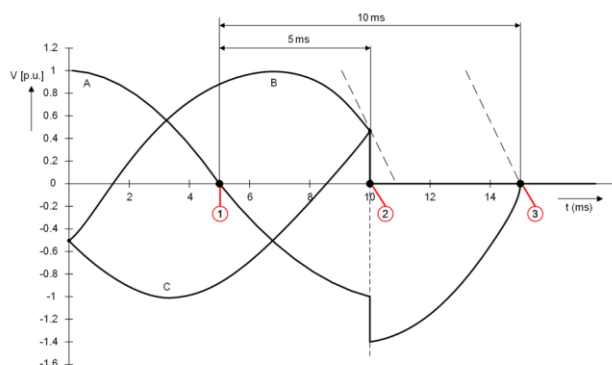
Slika 7. Optimalne tačke uključanja kondenzatorske baterije sa uzemljenom neutralnom tačkom

3.3.2 Kondenzatorska baterija sa izolovanom neutralnom tačkom. U slučaju kondenzatorskih baterija sa izolovanom neutralnom tačkom uključanje pri prolasku napona kroz nulu se drugačije interpretira u pogledu redosleda izvršenja komandi u poređenju sa kondenzatorskim baterijama kod kojih je neutralna tačka uzemljena.

Umesto da se svaka faza uključi nezavisno, u trenutku prolaska faznog napona kroz nulu, dve faze se uključuju istovremeno (Slika 8), u trenutku kada su njihovi naponi međusobno jednaki. To je momenat kada je međufazni

napon U_{L2-L3} jednak nuli, što rezultuje uključanjem faza L2 i L3 kondenzatorskih baterija pri nultom naponu.

Zatim, četvrtinu periode kasnije, faza L1 se uključuje u trenutku prolaska njenog napona kroz nulu.



Slika 8. Optimalne tačke uključanja kondenzatorske baterije sa izolovanom neutralnom tačkom

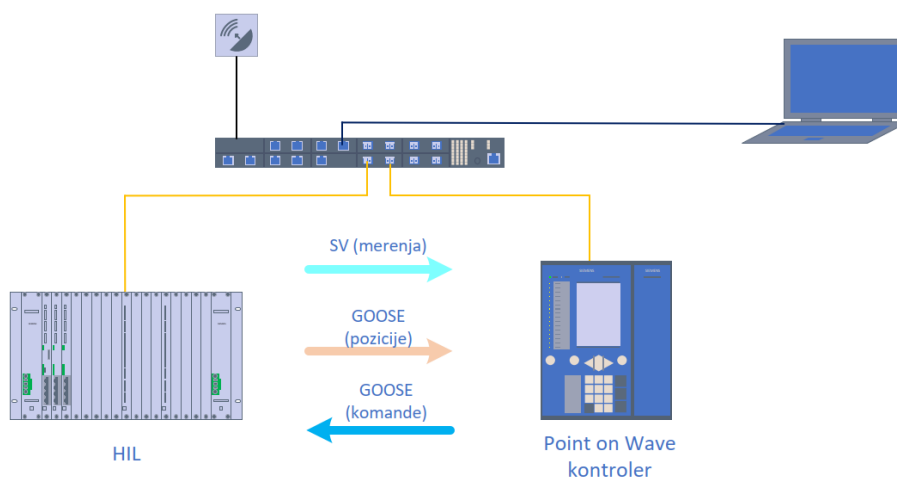
Vremenski trenuci od značaja, označeni brojevima na Slici 8, predstavljaju:

1. referentni trenutak kontrolera – prolazak napona faze L1 kroz nulu;
2. trenutak uključanja faza L2 i L3;
3. trenutak uključanja faze L1.

4. LABORATORIJSKI MODEL

Efekti primene tehnike kontrolisanog uključanja prekidača ispitani su u laboratorijskim uslovima, na primeru kompenzacione prigušnice 400 kV. U tu svrhu formirana je laboratorijska postavka (Slika 9) koju čine: mikrop procesorski uređaj za relejnu zaštitu i upravljanje kao kontroler prekidača, mrežni komunikacioni svič i Hardware-in-the-Loop (HIL) uređaj, na kome je realizovan model kompenzacione prigušnice 400 kV, prekidača VN i dela ostatka mreže.

Procesna mreža (prema standardu IEC 61850) na modelu je uprošćena, realizovana u topologiji „zvezda”, sa jednim mrežnim komunikacionim svičem. Komunikacioni svič ima ulogu i izvora vremenske sinhronizacije po protokolu IEEE 1588 *Precision Time Protocol* – PTP, koji je neophodan za generisanje validnih odbiraka mernih veličina – *Sampled Values*.



Slika 9. Blok-šema laboratorijske postavke

4.1 Model kompenzacione prigušnice

U okviru HIL uređaja modelovano je polje 400 kV koje se sastoji od kompenzacione prigušnice, prekidača, strujnih mernih transformatora i ostale relevantne VN opreme. Kompenzaciona prigušnica je nelinearna, spregnuta u zvezdu, sa direktno uzemljenom neutralnom tačkom. Njene tehničke karakteristike prikazane su u Tabeli III. Magnetsko kolo je sa vazдушnim zazorom i sastoji se od pet stubova.

Prekidač prigušnice modelovan je kao rasklopni element sa nezavisno upravljivim polovima, tehničkih karakteristika datih u Tabeli IV.

Tabela III Tehničke karakteristike kompenzacione prigušnice

Nazivni napon	420 kV
Nazivna frekvencija	50 Hz
Reaktivna snaga	250 Mvar
Nazivna struja	343,66 A
Sprega	Yn
Induktivnost namotaja	2,25 H (po fazi)

Tabela IV Tehničke karakteristike prekidača

Vreme mehaničkog uključenja prekidača	50 ms
Vreme mehaničkog isključenja prekidača	30 ms

Mreža je modelovana kao Thevenin-ov ekvivalent koji sledi iz snage kratkog spoja na mestu priključenja prigušnice. Amplituda i prigušenje udarnih struja prigušnice dominantno zavise od parametara prigušnice i trenutka uključenja prekidača, dok uticaj udaljenosti i „jačine” mreže ima sekundarni efekat i uglavnom utiče na amplitudu prenapona, a ne na efikasnost kontrolisanog uključenja. Uvažavanje otpornosti u kolu dovodi do dodatnog prigušenja tranzijenta i blagog faznog pomeraja optimalne tačke uključenja, ali nema suštinski uticaj na strategiju kontrolisanog uključenja niti značajno povećava grešku određivanja optimalnog trenutka.

Model primarne opreme na uređaju HIL realizovan je uz uvažavanje sledećih ograničenja:

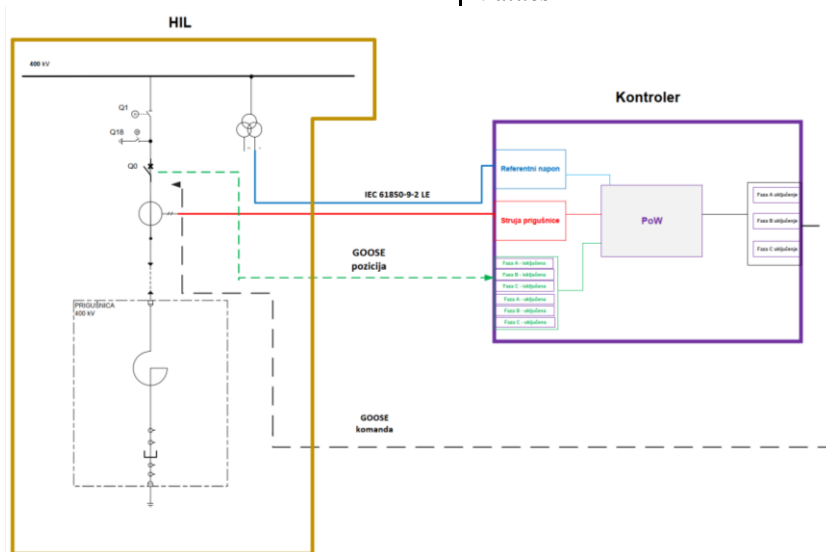
- ne postoje međusobne varijacije u operativnim vremenima polova prekidača; ona uvek odgovaraju zadatim vrednostima u sve tri faze;

- postavka uvodi kašnjenje komande od trenutka izdavanja sa kontrolera do njene registracije od strane uređaja HIL; kako se razmena informacija između kontrolera i uređaja HIL odvija porukama GOOSE, maksimalno kašnjenje je ograničeno na 1 ms;
- nulta vremenska razlika između trenutka uspostavljanja električnog i mehaničkog kontakta polova prekidača, što potvrđuje izostanak luka na oscilografskim zapisima.

4.2 Kontroler prekidača

Funkcija kontrolera implementirana je u okviru mikroprocesorskog uređaja za relejnu zaštitu i upravljanje (Slika 10). Na osnovu analize referentnog naponskog talasa, uzimajući u obzir podešene parametre, kao što su strategija uključenja i vremenske karakteristike prekidača, kontroler računa i uvodi optimalnu vremensku zadržku aktiviranja kalema za uključenje prekidača.

Referentni signal se dobija sa naponskog transformatora priključenog na sabirnicama 400 kV. Njega generiše uređaj HIL kao *SV publisher*, a kontroler preuzima kao *SV subscriber* u okviru formirane *Process Bus* mreže. Trenutne vrednosti napona se šalju u formi paketa odabiraka definisanih kao IEC 61850-9-2 *Sampled Values* strimovi.



Slika 10. Logički dijagram razmene informacija uređaja HIL i kontrolera

Sadržaj paketa prikazan je u Tabeli V. U svakom paketu merenja, pored odabiraka tri fazna i nultog napona, nalaze se i vrednosti faznih struja merenih na priključcima kompenzacione prigušnice, kao i računski vrednost nulte struje.

Informacije o položaju rasklopne opreme generiše uređaj HIL kao poruke GOOSE, dok kontroler šalje pakete GOOSE HIL-u sa nalogom za komandovanje pojedinačnim polovima prekidača.

Tabela V Sadržaj paketa odabiraka merenja

IEC 61850-9-2 <i>Sampled Value</i> strim							
Napon sabirnica				Struja prigušnice			
U _{L1}	U _{L2}	U _{L3}	3U ₀	I _{L1}	I _{L2}	I _{L3}	3I ₀
Poz 1	Poz 2	Poz 3	Poz 4	Poz 5	Poz 6	Poz 7	Poz 8

U kontroleru su aktivirane funkcije nadzora. Nakon svakog uključenja kontroler prikuplja podatke, analizira ih i po potrebi generiše alarm na uočenu neispravnost. Implementirane su sledeće funkcije:

- beleži vrednost izmerene udarne struje i poredi sa podešenim limitom, što na našem primeru odgovara vrednosti dvostruke nazivne struje prigušnice;
- meri mehaničko vreme uključanja prekidača na osnovu informacije o signalnim kontaktima prekidača, modelovanih na HIL uređaju, i registruje njegovo odstupanje u odnosu na podešenu vrednost;
- meri električno vreme uključanja prekidača na osnovu detekcije uspostavljanja struje i registruje njegovo odstupanje u odnosu na računatu vrednost.

5. REZULTATI ISPITIVANJA

Kako bismo sagledali efikasnost primene opisane tehnike, izvršeno je uporedno ispitivanje tri različite strategije uključanja prekidača prigušnice na laboratorijskom modelu, i to:

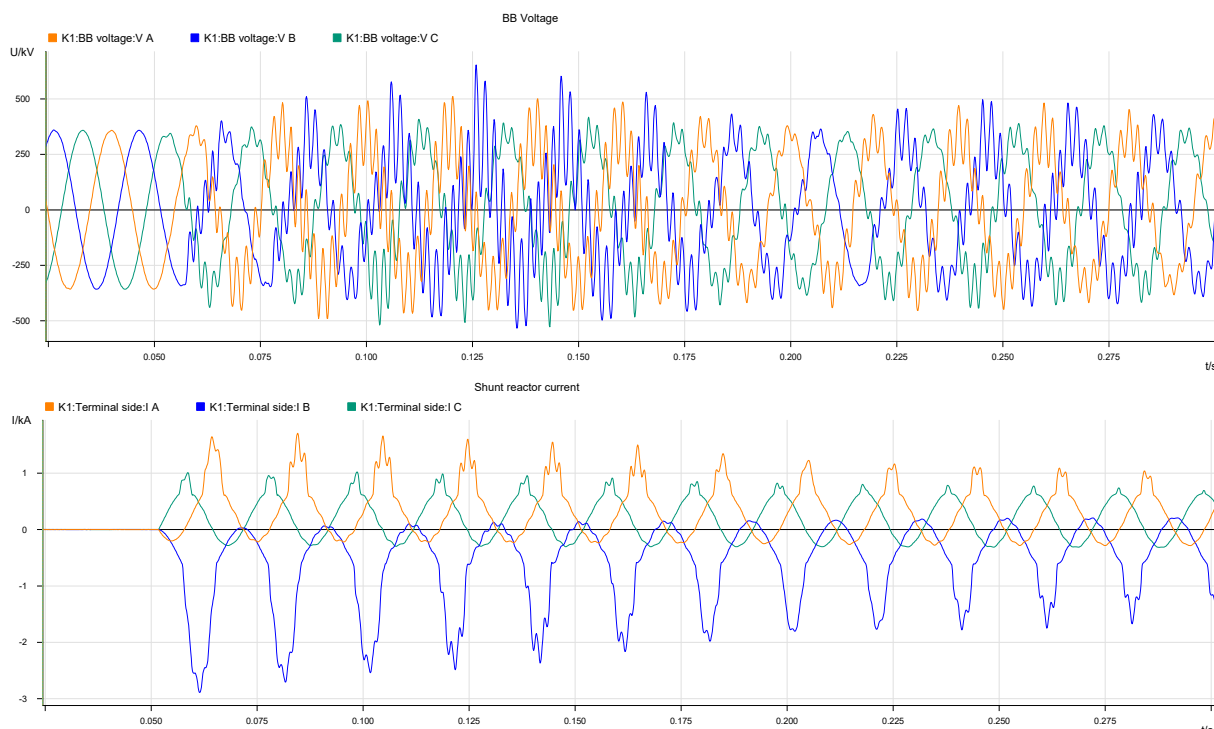
1. konvencionalno – nasumično istovremeno uključanje sva tri pola prekidača;

2. kontrolisano uključanje svakog pola prekidača u najnepovoljnijem trenutku;
3. kontrolisano uključanje svakog pola prekidača u optimalnom trenutku.

Nakon svakog uključanja, sa kontrolera su preuzeti oscilografski zapisi i liste događaja. Na osnovu njih se mogu očitati vrednosti i uporediti talasni oblici napona i struja prigušnice, kao i statusi pomoćnih kontakata prekidača.

5.1 Konvencionalno uključanje prekidača

Konvencionalno uključanje karakteriše istovremeno generisanje komande uključanja sva tri pola prekidača. Kontroler se u ovom slučaju ponaša kao pasivan element koji ne uvodi vremensku zadržku na registrovan nalog od sistema upravljanja. Kako je trenutak izdavanja komande nasumičan, stepen nesimetrije, kao i amplituda udarnih struja prigušnice zavise od trenutka izdavanja naloga, kao i operativnog vremena prekidača. Oscilografski zapis (Slika 11) potvrđuje istovremeno uključanje sva tri pola prekidača.



Slika 11. Talasni oblici struje i napona pri konvencionalnom uključanju

Na njemu je uočljiva zavisnost vrednosti udarne struje od trenutne vrednosti napona u trenutku uključanja. Izražen je udarni period velike vremenske konstante, tj. dužine trajanja. Pomenuto dovodi do primetnog izobličenja talasnih oblika napona i struja, ali i velikih vrednosti udarnih struja.

U ovom slučaju vršne vrednosti su iznosile $I_{L1} = 1,63 \text{ kA}$, $I_{L2} = 2,88 \text{ kA}$ i $I_{L3} = 955 \text{ A}$. Vrednost udarne struje provodnika neutralne tačke iznosi $I_N = 1,86 \text{ kA}$.

5.2 Kontrolisano uključanje svakog pola prekidača u najnepovoljnijem trenutku

Kako je prigušnica element induktivne prirode, kontrolisano uključanje svakog pola prekidača u trenutku prolaska napona kroz nulu u svakoj od faza predstavlja najnepovoljniji slučaj. Tada je izobličenje talasnih oblika najizraženije.

Premda upotreba kontrolera teži da ograniči tranzijent uključanja, pogrešnim odabirom njegovih parametara može doći do uključanja pri kome će negativni efekti biti najizraženiji.

Talasni oblici napona prikazani su na Slici 15, a struja na Slici 16.

Ovakvo uključanje praćeno je izuzetno visokim vršnim vrednostima udarnih struja $I_{L1} = 3,47 \text{ kA}$, $I_{L2} = 3,64 \text{ kA}$ i $I_{L3} = 3,80 \text{ kA}$. Do izražaja dolazi nesimetrija udarnih struja, pa vrednost struje provodnika za uzemljenje prigušnice dostiže svoj maksimum od $I_N = 3,33 \text{ kA}$ (Slika 12).

S obzirom na dužinu trajanja udarnog perioda, u zavisnosti od vremenskog zatezanja zemljospojne zaštite, može doći do njene nepotrebne prorade.

Takođe, zbog odnosa X/R parametara, jednosmerna (DC) komponenta struje sporo opada, što povećava verovatnoću da dođe do zasićenja strujnih transformatora.

5.3 Optimalno uključanje prekidača

Optimalna strategija uključanja prigušnice se zasniva na uključanju svakog pola prekidača pri maksimalnoj vrednosti napona. Referentni trenutak je prolazak talasnog oblika napona faze L1 kroz nulu (*zero crossing*). Cilj

kontrolera je da obezbedi uključanje pola L1 sa faznim pomerajem od 90° u odnosu na referentni trenutak, odnosno u momentu kada vrednost napona faze A dostigne svoj maksimum.

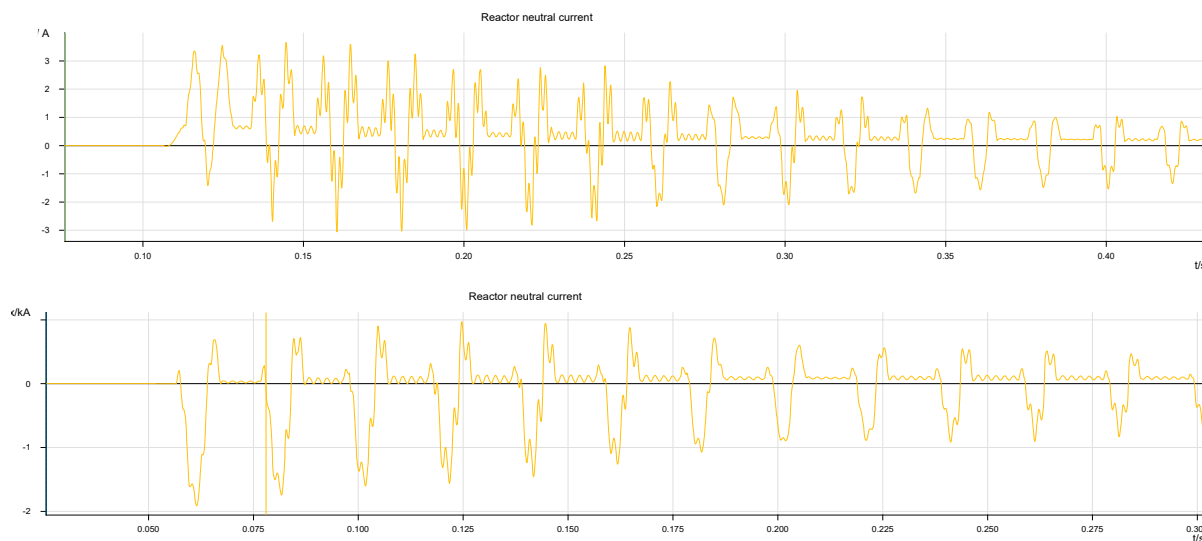
Svoj maksimum (sa negativnim predznakom) sledeća dostiže faza L3 za $90^\circ + 60^\circ = 150^\circ$, odnosno sa kašnjenjem od 3,33 ms u odnosu na fazu L1.

Poslednji korak je uključanje faze L2, i to sa teorijskom zadržkom od $90^\circ + 120^\circ = 210^\circ$, odnosno 6,66 ms.

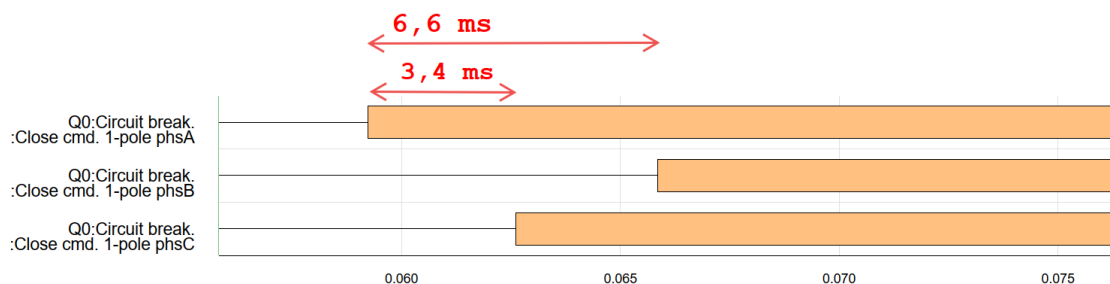
Na Slici 13 prikazano je sekvencionalno izdavanje komandi uključanja polova, dok se analizom događaja može utvrditi da ne postoje odstupanja operativnog vremena kontrolera od teorijski idealnih vrednosti.

Analizom oscilografskih zapisa uočeno je pravovremeno uključanja svakog pola. To potvrđuje primer faze L1 (Slika 14), gde se može videti uspostavljanje struje pri maksimalnoj vrednosti napona.

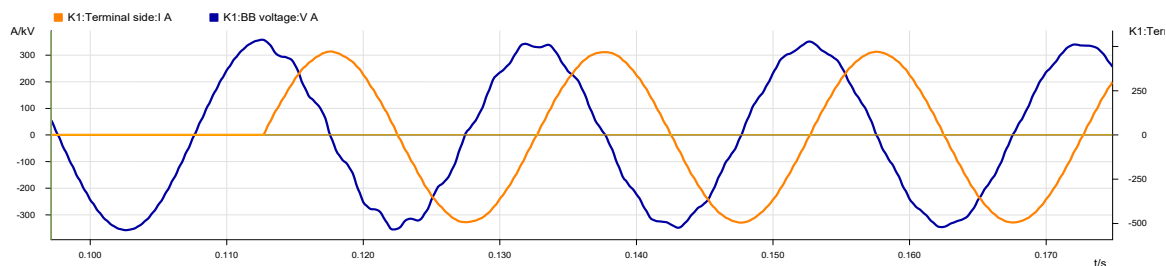
Poređenjem talasnih oblika napona (Slika 15) i struje (Slika 16) može se zaključiti da se primenom tehnike kontrolisanog uključanja potpuno eliminiše udarni period. Optimalnim uključanjem, izobličene talasne oblike napona je gotovo neprimetno, uz eliminaciju viših harmonika.



Slika 12. Talasni oblik nulte struje prigušnice najnepovoljnijeg (gore) i konvencionalnog (dole) uključanja prigušnice



Slika 13. Redosled izdavanja komandi uključanja polova prekidača



Slika 14. Trenutak uspostavljanja struje u odnosu na talasni oblik napona

Kontrolisanim uključenjem prekidača prigušnice ograničavaju se amplitude udarnih struja na $I_{L1} = 469 \text{ A}$, $I_{L2} = 523 \text{ A}$ i $I_{L3} = 488 \text{ A}$. Efektivna vrednost (RMS) struje uključivanja u prvoj periodu iznosi približno 340 A, što odgovara nazivnoj struji prigušnice.

Kontrolisano uključivanje potvrđuje simetrične talasne oblike struja i odsustvo DC komponente. Eliminacijom tranzijentnog perioda ograničava se vrednost udarne struje provodnika za uzemljenje prigušnice na $I_N = 358 \text{ A}$ (Slika 17).

Sa oscilografskog zapisa se može primetiti da je impuls tranzijenta nulte struje trajao približno 6 ms u slučaju optimalnog uključivanja, dok je na primeru

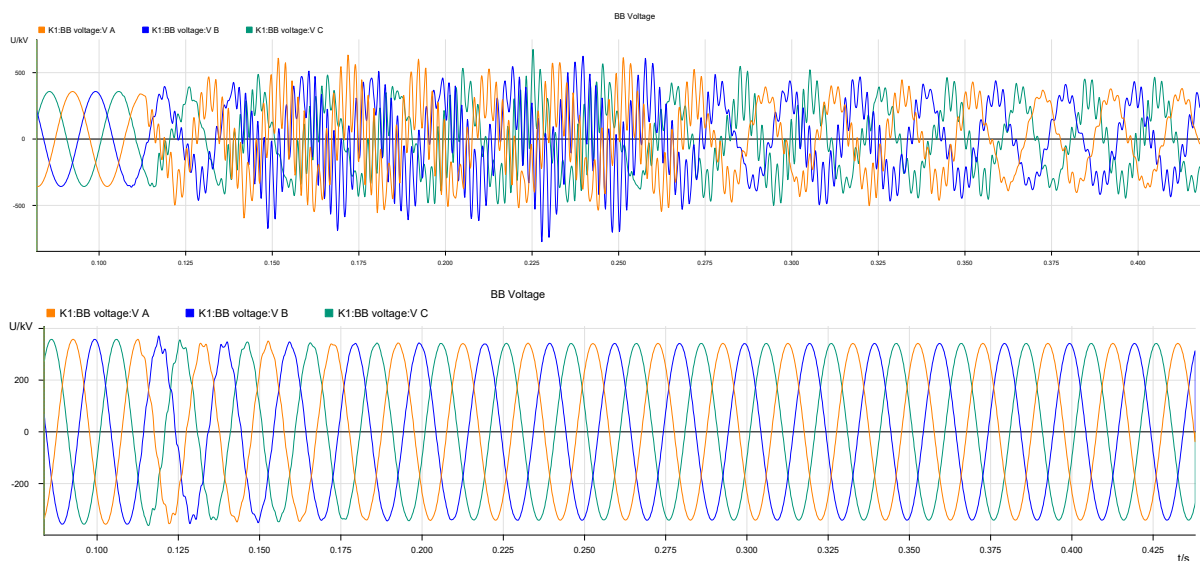
najnepovoljnijeg trajao duže od 500 ms. Tačno vreme nije izmereno jer je trajanje zapisa ograničeno.

Uticaj primene kontrolisanog uključivanja na ograničavanje vrednosti udarne struje prigušnice može se sagledati poređenjem izmerenih vrednosti sve tri strategije ispitane na laboratorijskom modelu (Tabela VI).

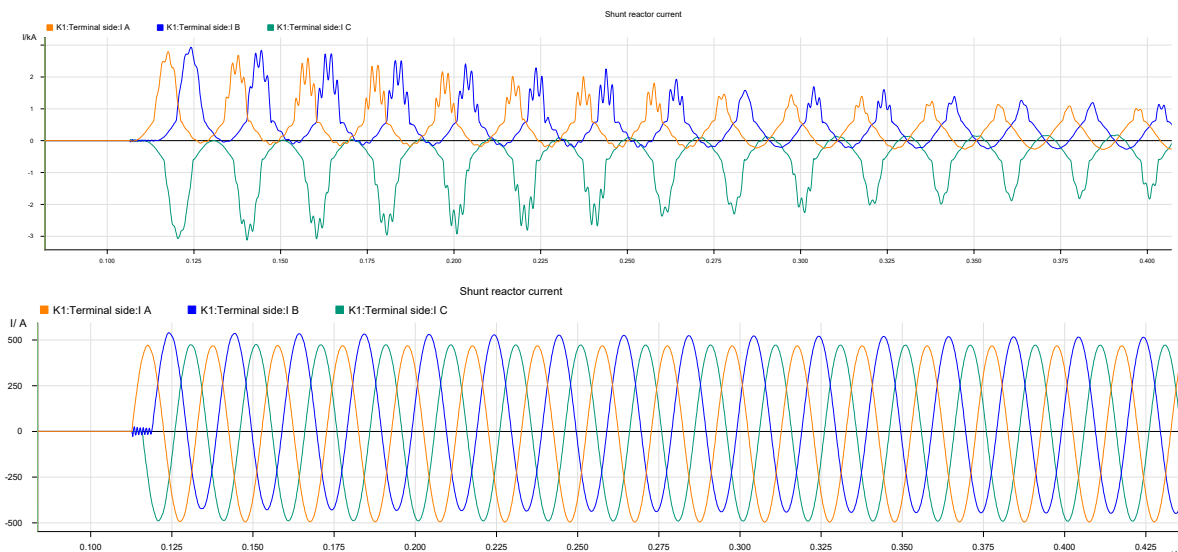
Maksimalna vrednost udarne struje je 3,80 kA, dok se kontrolisanim uključenjem ona ograničava na maksimalno izmerena 0,52 kA. Takođe, suzbijanje nesimetrije struja dovodi do ograničavanja vrednosti udarne struje provodnika za uzemljenje prigušnice sa $I_N = 3,33 \text{ kA}$ na $I_N = 0,36 \text{ kA}$.

Tabela VI Vrednosti udarnih struja prigušnice

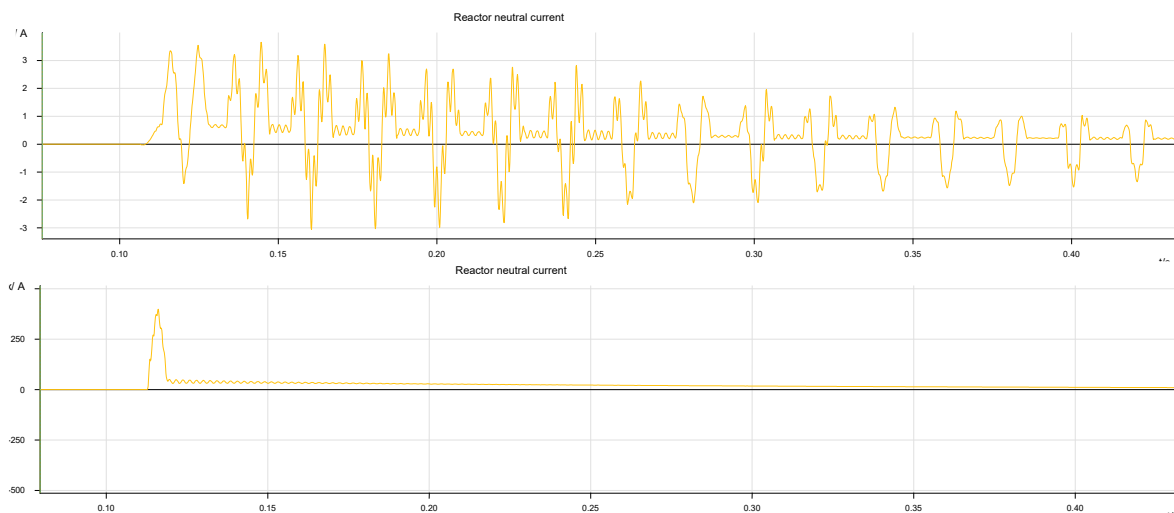
Udarana struja prigušnice	Faza L1 [kA]	Faza L2 [kA]	Faza L3 [kA]	I_N [kA]
Konvencionalno – nekontrolisano uključivanje	1,63	2,88	0,95	1,86
Kontrolisano – najnepovoljnije uključivanje	3,47	3,64	3,80	3,33
Kontrolisano – optimalno uključivanje	0,47	0,52	0,42	0,36



Slika 15. Talasni oblici napona najnepovoljnijeg (gore) i optimalnog (dole) uključivanja prigušnice



Slika 16. Talasni oblici struje najnepovoljnijeg (gore) i optimalnog (dole) uključenja prigušnice



Slika 17. Talasni oblik nulte struje prigušnice najnepovoljnijeg (gore) i optimalnog (dole) uključenja

6. ZAKLJUČAK

Konvencionalno (nekontrolisano) uključenje prekidača je nasumične prirode, odnosno talasni oblici zavise od vrednosti napona u trenutku uključenja. Generalno posmatrano, nekontrolisano uključenje dovodi do značajnog izobličenja talasnih oblika napona praćenog dugotrajnim prelaznim procesom i visokim vrednostima udarnih struja koje dostižu desetostruku vrednost nazivne struje. Uočene su vrednosti struja provodnika neutralne tačke od 1,86 kA koje usled dugačkog trajanja udarnog perioda mogu dovesti do nepotrebnog reagovanja relejne zaštite.

Od velikog značaja pokazala su se ispitivanja kontrolisanog uključenja u najnepovoljnijem trenutku. Time su dobijeni dosledni rezultati koji pružaju mogućnost analize uticaja primene optimalnog (*Point-on-Wave*) uključenja. Rezultati ispitivanja naveli su autore da steknu uvid u ključnu ulogu precizne koordinacije parametara kontrolera i vremena prekidača. Svaka razlika podešenog i

stvarnog vremena uključenja prekidača od 1 ms reflektuje se kao odstupanje od 18° u odnosu na optimalni trenutak uključenja. Upotreba kontrolera sa pogrešno podešenim parametrima rezultuje izraženijim sklopnim tranzijentom u odnosu na nasumično uključenje.

Analizom oscilografskih zapisa tri različite strategije uključenja prekidača prigušnice 400 kV, odnosno poređenjem talasnih oblika i vrednosti udarnih struja, potvrđena je potpuna eliminacija udarnog perioda primenom tehnike kontrolisanog uključenja. Sa daljim razvojem tehnologije dolazi do povećanja fleksibilnosti, pouzdanosti i jednostavnosti primene, uz istovremeno smanjenje ukupnih troškova implementacije, što omogućava njenu širu primenu u okviru elektroenergetskog sistema.

Na kraju treba istaći da isključenje prekidača prigušnice takođe donosi izazove kao što su „odsecanje” induktivne struje, ograničavanje povratnog napona i ponovno paljenja električnog luka. Upravo će ovi problemi biti predmet istraživanja autorâ u narednom periodu.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, br. ugovora: 451-03-137/2025-03/200103.

LITERATURA

- [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.

BIOGRAFIJE



Uroš Njegovan je rođen u Pančevu 1990. godine. U rodnom gradu je završio gimnaziju. Dalje školovanje nastavlja na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, gde završava osnovne i master akademske studije. Godine 2024. na istom fakultetu započinje doktorske studije na Odseku za energetiku. Trenutno je zaposlen u kompaniji „Siemens Energy d. o. o. Beograd”. Oblasti rada i interesovanja su mu relejna zaštita i digitalizacija elektroenergetskih postrojenja.

ORCID: 0009-0000-5626-0969



Zoran Stojanović je rođen u Požarevcu 1979. godine. Gimnaziju opšteg smera završio je u Svilajncu. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2003, 2009. i 2012, respektivno. U zvanje redovnog profesora na istom fakultetu izabran je 2022, dok kao gostujući profesor predaje na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Banjaluci, Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu i Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu. Oblasti njegovog stručnog i naučnog interesovanja su relejna zaštita, razvodna postrojenja, digitalna obrada signala, monitoring i dijagnostika visokonaponske opreme.

ORCID: 0000-0003-2432-394X



Aleksandar Marjanović je rođen u Beogradu 1991. godine. Završio je osnovnu školu i gimnaziju u Valjevu. Studije nastavlja na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, gde završava osnovne i master studije. Na istom fakultetu 2024. godine započinje doktorske studije na Odseku za energetiku. Trenutno je zaposlen u kompaniji „Siemens d. o. o. Beograd”. Oblasti rada i interesovanja su mu upravljanje elektroenergetskim sistemom i postrojenjima, digitalizacija elektroenergetskih postrojenja, integracija obnovljivih izvora i skladišta električne energije, kao i upravljanje mikromrežama.

ORCID: 0009-0004-3318-8967

Uroš 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, 2025 Reviewed: March 19th, 2026Modified: May 6th, 2026 Accepted: May 12th, 2026

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

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

UDK: 621.311.1(497.11)

621.311:351.824.11(497.11:4-6EU)

Marija Đorđević¹, Srđan Mladenović¹, Ivana Stamenić¹, Branko Šumonja¹

Implementacija evropskih procesa u operativni rad EMS AD

¹ Akcionarsko društvo Elektromreža Srbije, Beograd, Srbija*

Stručni rad

Ključne poruke

- Ovaj rad razmatra koordinisane procese koji se odvijaju na nivou evropskih operatora prenosnih sistema i glavne promene koje se sprovode u operativnom radu EMS AD
- Opisana su dva najbitnija procesa i to koordinisana sigurnost i koordinisani proračuni prenosnih kapaciteta
- Date su tehničke osnove za definisanje regiona za koordinisani proračun kapaciteta u regionu Jugoistočne Evrope
- Sagledane su mogućnosti srpskog operatora prenosnog sistema da ispuni regulatornu obavezu dodele prenosnog kapaciteta prema MACZT metodologiji

Kratak sadržaj

Na nivou ENTSO-E i Evrope odvijaju se procesi koji direktno utiču na elektroenergetski sektor Srbije i svakodnevni rad Operatora prenosnog sistema. Dva ključna procesa u okviru ENTSO-E – koordinisana analiza sigurnosti i koordinisani proračuni prenosnih kapaciteta – sprovode se na usklađen način. U okviru proračuna prenosnih kapaciteta primenjuju se dva metodološka pristupa: NTC i flow-based metod. Ovaj rad prikazuje regulatorni proces priključenja EMS AD evropskim regionima za proračun kapaciteta – CORE i SEE regionu – uz poseban osvrt na izazove sa kojima se EMS AD suočava u ovom kontekstu. Takođe, predstavljeni su osnovni koncepti koordinisanih procesa, koji će se delom realizovati unutar Operatora prenosnog sistema, a delom kroz regionalne koordinacione centre. Bez obzira na primenjenu metodologiju proračuna prenosnih kapaciteta u različitim fazama, neophodno je ispuniti pravilo dodele 70% kapaciteta kritičnog elementa. U radu su prikazani preliminarni rezultati ispunjenja ovog pravila, uzimajući u obzir da je njegova primena obavezna u skladu sa Zakonom o energetici.

Ključne reči

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

Primljeno: 19. novembra 2025. Recenzirano: 11. marta 2026.
Izmenjeno: - / bez primedbi / Odobreno: 12. marta 2026.

* Korespondirajući autor: Marija Đorđević, +381 64/840-86-69
Imejl: marija.djordjevic@ems.rs

Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju rada „Koordinisani procesi u EMS AD u skladu sa najnovijom evropskom regulativom” (<https://doi.org/10.2478/epi.2025.00008>), nagrađenog u Studijskom komitetu STK-C5 Tržište električne energije i regulacija, na 37. Savetovanju CIGRE Srbija, 26-30. maja 2025.

1. UVOD – REGULATORNI OKVIR

Novi zakonski okvir, kojim je transponovana evropska regulativa, doneo je novu realnost u operativnom planiranju i upravljanju prenosnim sistemom. Prema odluci Ministarskog saveta Energetske zajednice (*Energy Community*, EnC), donetoj 15. decembra 2022. godine o transponovanju evropske regulative u vezi sa elektroenergetikom u zakonodavne okvire svih članica Energetske zajednice, zemlje EnC-a obavezale su se da do kraja 2023. godine sprovedu transpoziciju u nacionalno zakonodavstvo. U pitanju su uredbe CEP (*Clean Energy Package*): 2019/942, 2019/943, 2019/941, kao i pet mrežnih kodova (SOGL, ER, CACM, FCA i GLEB), što predstavlja značajan korak u pravcu uključivanja Republike Srbije u jedinstveno evropsko tržište električne energije. Na ovaj način mrežni evropski kodovi su postali obaveza, u odnosu na ranu implementaciju mrežnih kodova koja je imala i neku meru proizvoljnosti.

Jedna od ključnih obaveza ugovornih strana Energetske zajednice u okviru transpozicije evropske regulative jeste definisanje regiona za sprovođenje koordinisanih aktivnosti, kao što su bezbednosne analize i proračuni kapaciteta. Osnovne odredbe koje se odnose na svakodnevni rad operatora prenosnog sistema su utvrđivanje regiona za operativnu sigurnost, kao i regiona za proračune prenosnih kapaciteta.

Druga bitna odrednica u koordinisanim proračunima prenosnih kapaciteta povezana je sa ispunjenjem kriterijuma dodele 70% prenosnog kapaciteta ili MACZT kriterijuma, što za posledicu može da ima to da se problemi sa sigurnošću rešavaju na kraćim vremenskim horizontima, kao što je intradnevni i vremenski horizont blizu realnom vremenu. Takođe, za očekivanje je i to da će se otklanjanje problema sa zagušenjima rešavati redišpečingom i kontratrgovinom (*counter-trading*), što za posledicu može imati značajne operativne i finansijske implikacije.

2. KOORDINISANI REGIONALNI PROCESI

Ovaj rad se neće baviti političkim konotacijama definisanja regiona, već samo tehničkim parametrima. Definisanje regiona za operativnu sigurnost (*Security Operational Region*, SOR) postoji već više decenija na nivou Jugoistočne Evrope i prvenstveno kao odgovor na potrebu za koordinisanim planiranjem isključenja na godišnjem, mesečnom i sedmičnom horizontu. Ova praksa je proistekla iz nužnosti međusobnog usaglašavanja aktivnosti među operatorima prenosnih sistema, posebno kada je reč o ključnim 400 kV, 220 kV i interkonektivnim dalekovodima.

Kasnije se ovaj pristup institucionalizovao kroz formiranje regionalnih koordinacionih centara (RCC), koji su proširili okvir koordinacije i na druge planerske aktivnosti, kao što su:

1. modelovanje sistema u različitim vremenskim horizontima: intradnevnom, dnevnom nivou, kao i na nivou za dva dana unapred, sedmičnom, mesečnom, pa do godišnjeg nivoa; ove aktivnosti se

odnose na izradu pojedinačnih modela, kao i zajedničkog modela interkonekcije, kao preduslova za sve planerske aktivnosti;

2. koordinisanje operativne sigurnosti i provere ispunjenosti sigurnosnih kriterijuma *N-1* i *N-x*, gde dominantnu ulogu preuzimaju koordinacioni centri za sigurnost;
3. koordinisanje regionalne/ENTSO-E kratkoročne adekvatnosti (*Short-term Adequacy*, STA);
4. koordinacija operativnog planiranja isključenja svih relevantnih elemenata na ENTSO-E nivou (*Operational planning coordination*, OPC).

EMS AD učestvuje u izradi zajedničkog mrežnog modela (*Common Grid Model*, CGM), koji je osnova za sve proračune koji se odnose na sigurnost prenosnog sistema i na proračune prenosnih kapaciteta. Kreiranje zajedničkog panevropskog modela odvija se na rotacionom principu svih evropskih regionalnih koordinacionih centara, a jedinstven zajednički model koristi se u celoj Evropi i u našem regionu. Ovako generisan zajednički model koristi se u analizama na nivou čitave ENTSO-E mreže, uključujući i region u kojem EMS AD deluje, čime se obezbeđuje koordinisano planiranje i operativna sigurnost sistema.

Kada je u pitanju regionalna koordinacija sigurnosti, u regionu Jugoistočne Evrope, koji obuhvata i zemlje članice Evropske unije (EU) i zemlje koje nisu u EU, primenjuju se evropski pristup i dinamički raspored aktivnosti sa ciljem da se još u fazi planiranja za dan unapred identifikuju potencijalna kritična stanja i blagovremeno preduzmu korektivne mere.

Zemlje u evropskim regionima za sigurnost implementirale su veoma složen proces koordinisane sigurnosti koji se odvija u tačno definisanim vremenskim intervalima. Operatori prenosnih sistema treba da dostave svoje mrežne modele (IGM) za naredni dan do 18 časova, kreiranje zajedničkog mrežnog modela (CGM) završava se u narednih sat vremena, a na njemu se sprovodi regionalna operativna analiza sigurnosti (*Cross-Regional Operational Security Assessments*, CROSA).

Ukoliko se ustanovi da postoje preopterećenja, potrebno je primeniti korektivne mere i kreirati nove modele mreže, a potom sprovesti novu koordinisanu operativnu analizu sigurnosti – tzv. CCROSA (*Coordinated Cross-Regional Operational Security Assessments*).

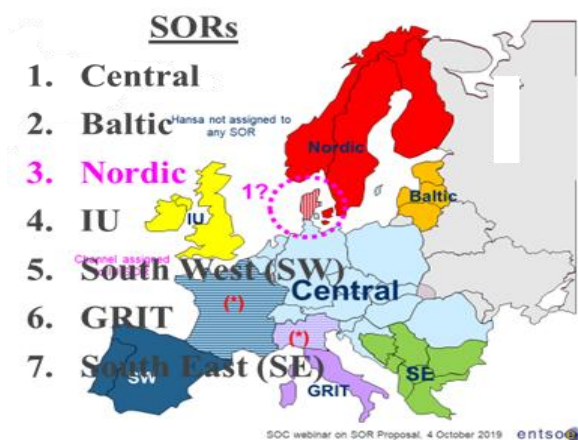
Ovakav režim rada zahteva da se operativne aktivnosti planiranja odvijaju i tokom popodnevne smene, često do 22 časa, a svaka faza procesa praćena je telekonferencijama na kojima aktivno učestvuju kako operatori prenosnih sistema (OPS, tj. *Transmission System Operator*, TSO) tako i regionalni koordinacioni centri (RCC).

U našem regionu, u saradnji sa SCC-om, Regionalnim koordinacionim centrom za sigurnost, sprovode se najbitnije aktivnosti koje predstavljaju uvod u kompletnu primenu CROSA procesa, kako je to nadalje opisano.

Izrada modela u D-1, koja se sprovodi do 18 časova, zatim spajanje zajedničkog modela i izrada analiza sigurnosti.

Svakodnevno se organizuju koordinacione telekonferencije na dnevnom nivou, u terminu između 20 časova i 22 časa, na osnovu sprovedenih sigurnosnih analiza radi razmatranja i, po potrebi, primene korektivnih mera (remidijalnih akcija). Ove akcije mogu imati nultu finansijsku posledicu, ali mogu uključivati i mere koje povlače operativne finansijske troškove.

Preduslov za potpuno uspostavljanje CROSA procesa jeste definisanje regiona za operativnu sigurnost, SOR-a. Na ENTSO-E nivou definisani su okviri SOR-ova (Slika 1), na kojima se obavljaju sve funkcionalnosti, definisane regulativom, na koordinisan način u saradnji sa drugim OPS-om i regionalnim koordinacionim centrima: Central, Baltic, Nordic, IU, South West (SW), GRIT i South East (SE).



Slika 1. Inicijalna definicija regiona za operativnu sigurnost

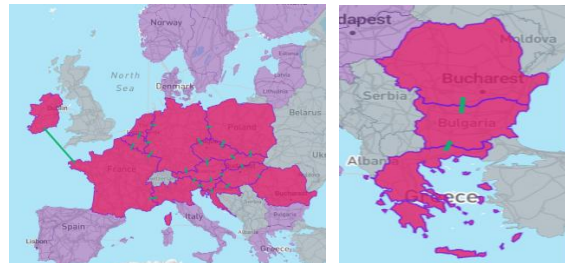
U toku je transpozicija regulative Evropske unije, pa kada je u pitanju region zemalja Energetske zajednice, SOR je u procesu redefinisavanja. Očekuje se da će buduća definicija SOR-a biti u korelaciji sa definicijom regiona za proračun prenosnih kapaciteta.

3. REGIONI ZA PRORAČUN PRENOSNIH KAPACITETA

U Evropi su već definisani Regioni za koordinirani proračun prenosnih kapaciteta, takozvani CCR-ovi, koji imaju razvijene svoje metodologije prilagođene specifičnostima regiona. Trenutno su definisani sledeći CCR-ovi: Baltički, Centralna Evropa, Core region, region Grčka–Italija, Hansa region, Severna Italija, Nordijski region, SEE region (Jugoistočna Evropa), SWE region (Jugozapadna Evropa).

U zemljama Energetske zajednice u toku je transpozicija, gde se na nivou zemalja Energetske zajednice definišu regioni za proračun prenosnih kapaciteta. Kao alternativa takozvanom *default* rešenju, koje je inicijalno predloženo na Ministarskom savetu, zbog netipičnosti pojedinih zemalja Energetske zajednice u toku je sprovođenje alternativnog rešenja koje podrazumeva da se zone trgovanja pripoje dvama postojećim evropskim regionima ili CCR-u. Na Slici 2 dat je prikaz regiona Centralne Evrope i regiona Jugoistočne Evrope, kojima bi

se u nekoj skorijoj perspektivi priključila Srbija. Ovim bi se EMS AD, srpski operator prenosnog sistema, CGES, crnogorski operator prenosnog sistema, i NOSBiH, operator za BiH, priključili evropskom CE/Core regionu, a ostali operatori prenosnih sistema u EnC zemljama bi se priključili SEE evropskom regionu.



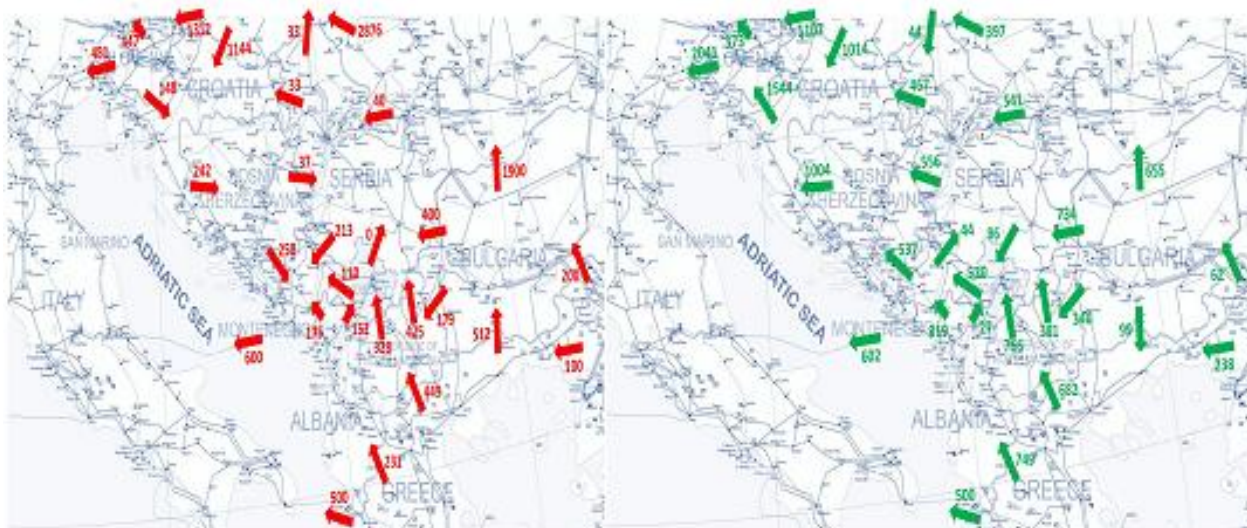
Slika 2. Prikaz CCR regiona Centralne i Jugoistočne Evrope



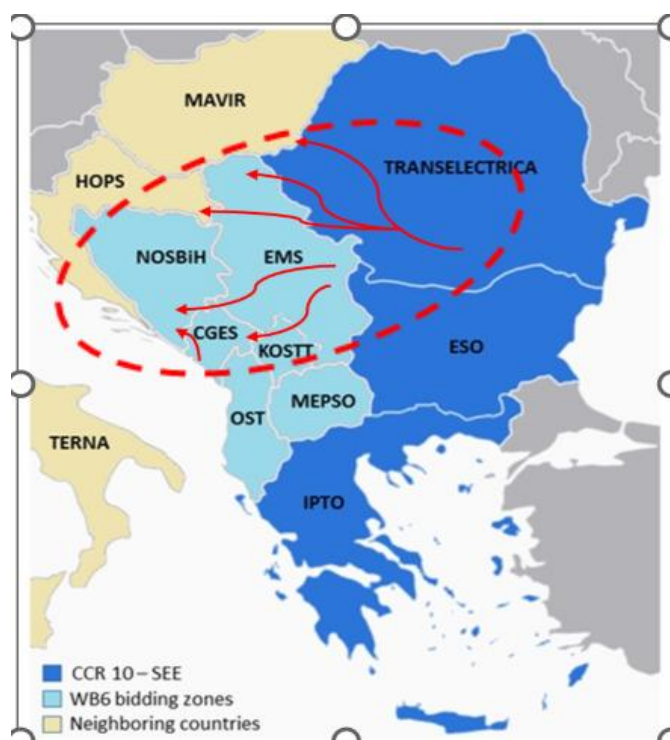
Slika 3. Definisanje regiona za proračun prenosnih kapaciteta

Rešenje je implementirano. Postoji više tehničkih pokazatelja koji potvrđuju opravdanost ovakve podela, a neki od ključnih su sledeći:

- analizom nekoliko nedavnih, najvećih poremećaja koji su se desili u poslednjih dvadesetak godina, i koji su se osetili na čitavoj sinhronoj oblasti, došlo je do razdeljivanja sistema u Hrvatskoj, Mađarskoj, Srbiji i Rumuniji; pokazalo se da postoje slabe tačke koje se moraju koordinisano razmatrati;
- važno je uspostaviti koordinirani proračun prenosnih kapaciteta zasnovan na tokovima snage ili korišćenjem koordinisanog NTC-a (neto prenosni kapacitet) kao prelaznog rešenja; ovim bi se izbegli nekontrolisani tokovi (kružni tokovi) koji su osnovni izvor nesigurnosti u prenosnoj mreži;
- efekat dostizanja 70% kapaciteta, jer se uzimaju uticaji tokova koji nisu kontrolisani i potiču iz drugih zona; trenutno se u EMS AD vidi veliki uticaj planiranih tokova (komercijalnih) na granici Mađarska–Rumunija, a fizički tokovi se zatvaraju preko prenosne mreže Srbije; prikaz tokova je dat na Slici 4 za jedan netipičan dan u kome je postojao veliki tranzit sa juga ka severu, zbog ogromne proizvodnje iz solarnih izvora električne energije u Grčkoj.



Slika 4. Planirane razmene i fizički tokovi na granicama u regionu za 9. 2. 2025. u 11.30 č.



Slika 5. Uticaj prekograničnih razmena između Core regiona i balkanskih zemalja

Ogromni uticaji tokova iz regiona JIE na tokove u CORE regionu. Tako, na primer, dalekovodi DV 400 kV „Ugljevik–Mitrovica” prema PTDF faktorima (*Power Transfer Distribution Factor*) imaju uticaj i do 13%, kao i DV 400 kV „Trebinje–Lastva” prema PTDF faktorima ima uticaj i do 13% na CORE region. Iz toga se može zaključiti da je veliki uticaj između CCR-ova koji se mora uzeti u obzir kako bi se na što tačniji način proračunali prenosni raspoloživi kapaciteti.

Ovo su razlozi zbog kojih se trenutno rekonfiguriše predefinisani region *Shadow* SEE CCR, gde bi se kreiralo alternativno rešenje u kome su EMS AD, CGES i NOSBIH priključeni CE/CORE regionu. Na ovaj način bi se dnevni proračuni kapaciteta sprovodili po metodi zasnovanoj na tokovima snage, gde se sagledava pojedinačno svaki

element mreže u najkritičnijim ispadima. Kao tehnički optimalno i regulatorno efikasno rešenje, proračuni raspoloživih prenosnih kapaciteta bi se najpreciznije realizovali ukoliko bi cela kontinentalna Evropa bila definisana kao jedinstveni region za proračun kapaciteta zasnovan na tokovima snage (*flow-based CCR*).

4. METODOLOGIJA ZA PRIMENU MACZT-a KAO INDIKATORA DOSTUPNOSTI PREKOGRANIČNIH KAPACITETA

ACER (Asocijacija evropskih regulatornih tela) izradio je Preporuku za određivanje minimalnog raspoloživog kapaciteta između zona trgovanja (*Margin Available for Cross-Zonal Trade – MACZT*), koja

predstavlja osnovu za proračun raspoloživih kapaciteta na zonama trgovanja i obezbeđuje ujednačen i transparentan pristup u svim zemljama regiona: „*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*”.

Margina raspoloživa za prekograničnu trgovinu (MACZT) koristi se kao tehnički indikator dostupnosti prenosne mreže za prekograničnu razmenu električne energije. Primenom MACZT-a omogućava se povezivanje fizičkih ograničenja prenosnog sistema sa rezultatima prekograničnih tokova, sa ciljem identifikacije strukturnih i operativnih faktora koji utiču na nivo raspoloživih kapaciteta.

MACZT se određuje i prati za limitirajući kritični mrežni element sa zagušenjem (*Critical Network Element with Contingency*, CNEC). Za svaki posmatrani vremenski okvir i kritični mrežni element, MACZT predstavlja meru fizičkog kapaciteta prenosne mreže koji je stavljen na raspolaganje prekograničnoj trgovini.

MACZT se definiše kao zbir margine dobijene kroz koordinisan proračun prekograničnih kapaciteta i uticaja protoka koji nisu obuhvaćeni koordinisanim proračunom kapaciteta:

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

gde indeks i označava limitirajući kritični mrežni element sa zagušenjem.

Margina iz koordinisanog proračuna kapaciteta (*Margin from Coordinated Capacity Calculation*, MCCC) predstavlja deo margine raspoložive za prekograničnu trgovinu koji proizilazi iz koordinisanog proračuna prekograničnih kapaciteta, unutar definisane koordinacione oblasti.

MCCC odražava uticaj prekograničnih razmena na kritične mrežne elemente koji se planiraju i računaju zajednički od strane više operatora prenosnih sistema, u skladu sa dogovorenim metodologijama i unutar iste koordinacione oblasti.

U slučaju primene koordinisanog NTC pristupa, MCCC se izračunava kao zbir proizvoda pozitivnih PTDF vrednosti kritičnog mrežnog elementa i neto prenosnih kapaciteta po pojedinačnim orijentisanim prekograničnim pravcima:

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

gde:

1. $pPTDF_{i,b}$ predstavlja pozitivnu vrednost PTDF faktora kritičnog mrežnog elementa i u smeru odgovarajućeg orijentisanog prekograničnog pravca b ;
2. NTC_b predstavlja neto prenosni kapacitet određen u postupku proračuna kapaciteta za prekogranični pravac b za razmatrani vremenski okvir.

Formulom (2) sumarno se obuhvataju svi prekogranični pravci koji pripadaju posmatranj koordinacionoj oblasti.

Na ovaj način, MCCC predstavlja deo raspoložive margine koji je pod direktnom kontrolom koordinisanog planiranja kapaciteta i koji u najvećoj meri odražava efikasnost procesa proračuna prekograničnih kapaciteta unutar koordinacione oblasti (CCR).

Margina iz nekoordinisanih uticaja (*Margin from Non-Coordinated Capacity Calculation*, MNCC) predstavlja deo margine koji odražava uticaj tokova koji nisu obuhvaćeni koordinisanim proračunom kapaciteta, odnosno tokova koji potiču od razmena van koordinacione oblasti (CCR).

Ova komponenta obuhvata uticaj:

- tokova koji nisu predmet zajedničkog regionalnog proračuna;
- neto pozicija zona trgovanja koje nisu uključene u koordinisan proračun kapaciteta.

MNCC se određuje na osnovu relevantnih PTDF vrednosti i odgovarajućih neto razmena/pozicija koje izazivaju fizičke tokove na mreži, a koje operatori prenosnih sistema ne mogu direktno optimizovati u okviru koordinisanog proračuna prenosnih kapaciteta.

MNCC je često negativna komponenta, jer nekoordinisani tokovi mogu dodatno opteretiti kritične mrežne elemente i smanjiti marginu raspoloživu za prekograničnu trgovinu.

Primena MACZT metodologije omogućava kvantifikaciju ukupne margine raspoložive za prekograničnu trgovinu i razdvajanje njenih komponenti na koordinisanu (MCCC) i nekoordinisanu (MNCC). Analiza ovih komponenti ukazuje na to da ograničenja dostupnosti prekograničnih kapaciteta ne proizilaze isključivo iz procesa proračuna kapaciteta, već su u velikoj meri uslovljena fizičkim ograničenjima prenosne mreže.

Deo koji se odnosi na fizička zagušenja mreže biće detaljno opisan u Poglavlju 6 ovog rada, koje se odnosi na obavezu OPS-a da izradi dokument koji se zove Akcioni plan.

5. PRELIMINARNO SAGLEDAVANJE ISPUNJAVANJA KRITERIJUMA MACZT (70% DODELJENOG KAPACITETA)

EMS AD već više od decenije na nivou Jugoistočne Evrope sa OPS-ovima iz regiona sprovodi elemente koordinisanih proračuna raspoloživih prenosnih kapaciteta. Osnovne zajedničke aktivnosti obuhvataju harmonizaciju totala, razmenu mesečnih pojedinačnih modela, spajanje jedinstvenog zajedničkog modela na kome se sprovode proračuni po principu neto prenosnog kapaciteta, odnosno NTC metodologije. Koordinacija se odvija na bazi dogovora OPS-ova prema godišnjem kalendaru.

Uvođenjem Regionalnih koordinacionih centara (RCC), procesi proračuna su podignuti na značajno viši nivo, posebno u pogledu vremenskih horizonata i metodološke tačnosti. Naš regionalni RCC–SCC sprovodi sedmične proračune NTC vrednosti za sve zone trgovanja operatora koji koriste njegove usluge.

Uvođenjem mrežnog koda *Guideline on Capacity Allocation and Congestion Management* (CACM), koji je

u naše zakonodavstvo transponovan preko Uredbe o uspostavljanju smernica za raspodelu kapaciteta i upravljanje zagušenjima, proračuni na dnevnom i intradnevnom nivou moraju se sprovoditi u okviru RCC-a i to prema metodologiji zasnovanoj na tokovima snage. U određenim slučajevima, dozvoljena je i privremena primena NTC metodologije, pod uslovom da operatori dokažu da *flow-based* pristup ne bi bio efikasniji, uz pretpostavku identičnog nivoa sigurnosti sistema.

U oba metodološka pristupa proračuna prenosnih kapaciteta potrebno je ispuniti pravilo 70% dodeljenog kapaciteta ili takozvano MACZT pravilo.

Novi Zakon o energetici (ZOE) precizirao je obavezu ispunjenja kriterijuma za oba metodološka pristupa:

1. za granice između zona trgovanja na kojima se primenjuje metodologija proračuna kapaciteta zasnovana na harmonizovanom neto prenosnom kapacitetu (NTC), operatori prenosnog sistema dužni su da obezbede minimalno 70% kapaciteta identifikovanog kritičnog elementa za prekograničnu trgovinu, pod uslovom da su ispunjeni kriterijumi sigurnosti za definisanu listu ispada;
2. za granice između zona trgovanja za koje se primenjuje proračun kapaciteta zasnovan na tokovima snage minimalni kapacitet je margina dostupna za tokove usled razmene između zona trgovanja na svakom kritičnom elementu mreže, koji treba da iznosi 70% kapaciteta uz ispunjenje kriterijuma sigurnosti za određenu listu ispada, dok preostali iznos od 30% kapaciteta može da se koristi za marginu pouzdanosti, kružne tokove i unutrašnje tokove.

Obavezu ispunjenja kriterijuma 70% dodele kapaciteta EMS AD studiozno je sagledavao i pre stupanja na snagu novog ZOE i blagovremeno nabavio TNA alat sa datim performansama. Preliminarne analize koje je EMS AD sproveo za 2024. i delimično za 2025. godinu pokazuju da se stepen ispunjenja MACZT kriterijuma (70% dodeljenog kapaciteta za prekograničnu trgovinu) kreće u rasponu od 30% do 70% MACZT-a, ali u odnosu na kapacitet koji je EMS AD proračunao.

Međutim, harmonizovana (finalna) NTC vrednost zavisi i od proračuna susednog operatora prenosnog sistema, s obzirom na to da se na svakoj granici usvaja niža vrednost od dve predložene vrednosti. Takođe, EMS AD na transparentan način više godina unazad kontroliše KPI – indikatore kvaliteta, gde se zapravo dešava da je na bilateralnom usaglašavanju prenosnih kapaciteta, u većini slučajeva, susedni OPS bio uzrok manje finalne harmonizovane vrednosti, koje su date kasnije na alokaciju.

Međutim, sve zemlje – i EU članice i one koje to nisu – imaju obavezu ispunjenja propisanog pravila, tako da će se svi OPS-ovi truditi da dostignu zahtevanih 70% dodeljenog kapaciteta.

U Tabeli I data je procena ispunjenosti kriterijuma MACZT ukoliko bi se analizirali prosečni dodeljeni kapaciteti u poslednje tri godine na pojedinim granicama. Uzet je princip da se usvaja veća vrednost od srednje vrednosti po smeru ili vrednost iz 2024. godine. Procenat

ispunjenosti je dat u Tabeli I u odnosu na zimske limite i kreće se od 28% do 49%.

U radu su prezentovani i rezultati ukoliko bi se proračuni MACZT kriterijuma radili po definisanoj ENTSO-E metodologiji, a ne prema prosečnim dodeljenim vrednostima prenosnih kapaciteta. Najpre je prikazan princip sagledavanja MACZT kriterijuma, a potom sumarna sagledavanja ispunjenosti za nekoliko meseci u 2025. i 2024. godini.

U Tabeli II analiziran je april 2025. i dat je primer kada je kriterijum MACZT ispunjen, čak 75% na kritičnom elementu DV 400 kV „Porcile de Fier (Portile de Fier) – Đerdap”, za slučaj ispada nekoliko kritičnih DV 400 kV: „Bor 2 – Đerdap”, „Bor 2 – Niš 2”, „Pančevo 2 – PRP Čibuk” i „Drmno – PRP Čibuk”.

Tabela I Procenat ispunjenosti MACZT kriterijuma, ukoliko se uzimaju prosečne alocirane NTC vrednosti

	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

Tabela II Prikaz MACZT-a za proračun NTC od Bugarske i Rumunije prema Srbiji

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

EMS-ov predlog za kompozitni NTC na granici RS > BG + RO bio je 1900 MW, dok je NTC cilj za dostizanje 70% kapaciteta iznosio od 1596 MW do 1801 MW.

Ukoliko se posmatra drugi smer, od BG + RO → RS, uočava se da je dostignuti MACZT 69%, kada je EMS AD predložio kompozitni NTC od 1900 MW. Da bi se inače dostigao kriterijum 70% MACZT-a, ponuđeni NTC bi trebalo da bude 1928 MW. Rezultati su prikazani u Tabeli III.

Tabela III Prikaz MACZT-a za proračun NTC od Bugarske i Rumunije prema Srbiji

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

Primer iz juna 2024. analiziran je na granici RS → HR, BA, gde je ispunjenost kriterijuma 57%, pri čemu je EMS-ov predlog za kompozitni NTC bio 1200 MW. Već na NTC

vrednosti od 843 MW dolazi do preopterećenja kritične grane DV 220 kV „Obrenovac – Valjevo 3”, pri ispadu DV 400 kV „RP Mladost – S. Mitrovica”. Za dostizanje 70% kriterijuma MACZT trebalo bi alocirati čak 1524 MW, pri čemu bi kritični element bio veoma opterećen. Rezultati su prikazani u Tabeli IV.

U suprotnom smeru HR, BA → RS, pri ispadu DV „Trebinje–Lastva” preopterećuje se DV 220 kV „Višegrad–Požega”, a predloženi NTC je 900 MW, pri čemu je ispunjenost kriterijuma 61%. Rezultati su prikazani u Tabeli V.

Tabela IV Prikaz MACZT-a za proračun NTC od Srbije prema Hrvatskoj i Bosni i Hercegovini

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

Tabela V Prikaz MACZT-a za proračun NTC od Hrvatske i Bosne i Hercegovine prema Srbiji

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

Vidimo da je za dostizanje datog uslova od 70% prenosna mreža često preopterećena, i u tom slučaju bi se problem rešavao u realnom vremenu redišpejingom, koji ima finansijske posledice.

U radu je takođe prezentovan proračun MACZT kriterijuma koji razmatra kritične elemente u mreži za nekoliko karakterističnih meseci iz 2024. i 2025. godine. Napomena je da su procene rađene prema EMS-ovim predlozima dobijenim iz proračuna u skladu sa ENTSO-E metodologijom. Vrednosti koje su bile alocirane uglavnom su smanjene zbog susednih OPS-ova u procesu harmonizacije, gde je princip da se usvoji minimalna predložena vrednost dva susedna OPS-a.

Sumarni rezultati su prikazani u tabelama VI–IX.

U EMS-ovim proračunima postoji nekoliko usvojenih pretpostavki, i to su:

- rezultati su prikazani sa vrednostima koje su u EMS AD proračunavane sa namerom da se dodeli sav raspoloživ kapacitet na tržište električne energije; međutim, finalne vrednosti koje su date na alokaciji su vrednosti harmonizovane sa susednim OPS-om, usvojene po kriterijumu prihvatanja niže vrednosti;
- vrednosti date u radu odnose se na mesečne proračune, ali su one veće na dnevnom nivou jer se na nekoliko granica rađe proračuni i usaglašavanje dnevnih vrednosti NTC-ova, pa je iskorišćenost mreže veća;
- proračun mora da obuhvati koordinaciju regiona za proračun prenosnih kapaciteta i mora se sprovesti na evropskom zajedničkom modelu kako bi nekoordinisani tokovi snage iz drugih zona bili što manji.

Tabela VI Analiza ispunjenosti MACZT-a za jul 2024.

Jul 2024.	Na kritičnom koraku		NTC target [MW]	EMS predlog	
	NTC calculated [MW]	MACZT[%]		NTC [MW]	MACZT [%]
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

Tabela VII Analiza ispunjenosti MACZT-a za april 2025.

April 2025.	Na kritičnom koraku		NTC target [MW]	EMS predlog	
	NTC calculated [MW]	MACZT[%]		NTC [MW]	MACZT [%]
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

Tabela VIII Analiza ispunjenosti MACZT-a za jun 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

Tabela IX Analiza ispunjenosti MACZT-a za avgust 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

6. AKCIONI PLAN I STRUKTURNA ZAGUŠENJA U PRENOSNOJ MREŽI

Uredba (EU) 2019/943 o unutrašnjem tržištu električne energije propisuje obavezu operatora prenosnih sistema da stavljaju na raspolaganje tržišnim učesnicima najmanje 70% raspoloživih prenosnih kapaciteta na interkonekcijama od značaja za prekograničnu trgovinu. Ova uredba je u Energetsku zajednicu inkorporirana Odlukom Ministarskog saveta 15. decembra 2022. godine. Član 15 Uredbe predviđa da države ugovorne strane moraju postepeno povećavati dostupne kapacitete po linearnoj putanji, tako da se do 31. decembra 2027. dostigne minimum od 70%. Do tog datuma, ako postoje strukturalna zagušenja, države moraju imati akcione planove za njihovo otklanjanje, ali i svake godine povećavati kapacitet za prekograničnu trgovinu. Dakle, pravilo 70% postaje obavezujuće od kraja 2027. godine, a do tada ugovorne strane Energetske zajednice moraju postepeno usaglašavati svoje kapacitete kroz akcione planove i izveštavanje.

Novi Zakon o energetici obezbeđuje nacionalni pravni i institucionalni okvir koji omogućava primenu i postepeno usaglašavanje sa zahtevima Uredbe (EU) 2019/943 i drugih propisa koji proizilaze iz paketa „Čista energija za sve Evropljane”.

Izmenama i dopunama Zakona o energetici („Službeni glasnik RS”, br. 145/2014, 95/2018 – dr. zakon, 40/2021 i 94/2024), koje su usvojene 21. novembra 2024. godine i stupile na snagu 29. novembra 2024. godine, u nacionalni pravni okvir su prvi put uvedene odredbe koje transponuju ključne principe Uredbe (EU) 2019/943 o unutrašnjem tržištu električne energije.

Prema stavu 9, člana 164 Zakona o energetici, operator prenosnog sistema je dužan da obezbedi godišnje povećanje raspoloživih prenosnih kapaciteta duž linearne putanje između zona trgovanja, sve do dostizanja minimalnih vrednosti utvrđenih u skladu sa članom 165a Zakona o energetici. Minimalni nivoi prenosnih kapaciteta moraju biti dostignuti najkasnije do 31. decembra 2027. godine.

Niske ili promenljive vrednosti MACZT-a ukazuju na postojanje ograničenja u prenosnoj mreži, koja nisu isključivo posledica načina proračuna prekograničnih kapaciteta, već su uslovljena fizičkom konfiguracijom prenosne mreže, kapacitetima pojedinih mrežnih elemenata i načinom raspodele tokova u sistemu. Iz tog razloga, analiza MACZT-a predstavlja polaznu osnovu za identifikaciju strukturalnih zagušenja u prenosnoj mreži.

Zbog toga je, radi definisanja efikasnih i održivih mera u Akcionom planu, neophodno identifikovati i analizirati strukturalna zagušenja u prenosnoj mreži, odnosno trajna ili ponavljajuća mrežna ograničenja koja dovode do

smanjenja MACZT-a i ograničavaju raspoloživost prekograničnih kapaciteta.

Na osnovu tehničkih analiza i izveštaja koje je pripremila „Elektromreža Srbije”, identifikovana su strukturalna zagušenja u prenosnom sistemu Republike Srbije, koja predstavljaju ograničenja u pružanju raspoloživih prenosnih kapaciteta za prekograničnu trgovinu električnom energijom. Ova zagušenja nisu ograničena samo na prenosni sistem Republike Srbije već obuhvataju i elemente mreže u susednim sistemima, imajući u vidu visok stepen međusobne povezanosti i zajednički uticaj na tokove električne energije u regionu Jugoistočne Evrope:

1. interkonekcija sa Bosnom i Hercegovinom (Bajina Bašta – Požega – Višegrad): ograničenja usled termičkih kapaciteta i nedovoljne automatizacije upravljanja tokovima;
2. interkonekcija sa Crnom Gorom (Pljevlja–Bistrica);
3. 400 kV DV „RP Đerdap – Porcile de Fier”;
4. TR 400/110 kV u TS „Smederevo 3”;
5. 400 kV DV „RP Đerdap – RP Drmno”;
6. TR 400/110 kV u TS „Bor 2”;
7. 220 kV DV „Obrenovac – Beograd 3”;
8. 400 kV DV „Pančevo 2 – Beograd 20”;
9. TR 220/110 kV u TS „Sremska Mitrovica 2”.

Akcionim planom definišu se planirane mere za smanjenje identifikovanih strukturalnih zagušenja u prenosnom sistemu. Planirane mere obuhvataju:

- razvoj i optimizaciju mreže;
- proširenje mreže;
- koordinisani proračun prenosnih kapaciteta;
- rezerve u mreži zbog redispečinga;
- koordinaciju korektivnih mera.

Ove mere su grupisane u dva glavna područja delovanja:

1. razvoj i optimizacija mreže – obuhvata prve dve tačke;
2. unapređenje upravljanja zagušenjima – obuhvata preostale tri tačke.

Razvoj i optimizacija prenosne mreže, raspored realizacije ovih mera definisani su Planom razvoja EMS AD. Unapređenje upravljanja zagušenjima odvijaće se na regionalnom nivou u saradnji sa RCC-ovima koji će u saradnji sa OPS-ovima sprovoditi koordinisane aktivnosti.

7. RAZVOJ I OPTIMIZACIJA PRENOSNE MREŽE

Kako bi se adekvatno odgovorilo na buduće izazove, uključujući i nove zahteve definisane članom 16(8) Uredbe o tržištu električne energije, održivo proširenje mrežne infrastrukture predstavlja jedan od ključnih preduslova za pouzdan i efikasan rad sistema. Prenosna mreža se kontinuirano razvija, a u okviru cikličnog procesa

planiranja redovno se identifikuju buduće potrebe i definišu odgovarajuće mere za njihovo ispunjenje. EMS AD ima zakonom propisane obaveze u cilju obezbeđivanja održivog razvoja prenosnog sistema Republike Srbije.

Kroz svoju srednjoročnu i dugoročnu strategiju razvoja, u narednom desetogodišnjem, odnosno dvadesetogodišnjem periodu, EMS AD planira obimna ulaganja u obnovu postojećih i izgradnju novih prenosnih kapaciteta. Ovi infrastrukturni objekti će unaprediti pouzdanost napajanja korisnika prenosnog sistema i povećati prekogranične kapacitete za razmenu električne energije, što je od velikog međunarodnog (regionalnog) značaja. Planski međunarodni projekti u kojima učestvuje EMS AD, sagledani u okviru panevropskog desetogodišnjeg plana razvoja (TYNDP paketa), kao što se može videti na narednoj slici, utićuće na povećanje prenosnih kapaciteta na čak šest granica Republike Srbije.



Slika 6. Prikaz glavnih prenosnih koridora i dominantnih pravaca tokova u elektroenergetskom sistemu Srbije i regionu

U skladu sa Strategijom razvoja energetike Republike Srbije, planovima razvoja proizvodnog i distributivnog sistema i poslovnom strategijom EMS AD, ulaganja u infrastrukturu za prenos električne energije usmerena su na sledeće ciljeve:

- povećanje sigurnosti rada prenosnog sistema i pouzdanosti napajanja korisnika prenosnog sistema, što je i zakonska obaveza EMS AD;
- povećanje prekograničnih prenosnih kapaciteta Republike Srbije koji imaju regionalni i panevropski značaj;
- uravnotežen, održiv i blagovremen razvoj prenosnog sistema sa ciljem priključivanja novih konvencionalnih i obnovljivih izvora električne energije i objekata kupaca;
- razvoj tržišta električne energije na nacionalnom i regionalnom nivou.

U skladu sa odredbama Zakona o energetici Republike Srbije, EMS AD najmanje jednom na svake dve godine donosi plan razvoja za naredni desetogodišnji period.

Prema članu 111 srpskog Zakona o energetici iz 2024. godine, neophodni projekti razvoja mreže se sumiraju u Planovima razvoja mreže, koje na svake dve godine izrađuje operator prenosnog sistema EMS AD, a koje mora da odobri regulatorno telo.

Snažna i pouzdana mreža je ključni faktor za postizanje minimalnog kapaciteta koji treba da bude dostupan za prekograničnu trgovinu, u skladu sa članom 16(8) Uredbe.

Desetogodišnji plan razvoja se svake godine ažurira i ima za cilj povećanje prenosnog kapaciteta, smanjenje zagušenja u mreži i olakšavanje postizanja ciljeva. Mere za postizanje ovih ciljeva uključuju ojačanja i optimizaciju postojeće mreže, kao i razvoj nove infrastrukture. Snažna i pouzdana mreža je ključan činilac za postizanje kriterijuma 70% iz Uredbe. U narednim godinama planirano je ojačanje ili optimizacija više postojećih dalekovoda i transformatorskih stanica.

U skladu sa članom 15(1) Uredbe o tržištu električne energije, Akcioni plan mora da sadrži odredbe koje se odnose na praćenje njegove primene. Praćenje je ključno kako bi se obezbedilo da se planirane mere za povećanje kapaciteta prekogranične trgovine i smanjenje strukturnih zagušenja zaista sprovedu u skladu sa definisanom linearnom putanjom i da se ne ugrožava sigurnost rada elektroenergetskog sistema.

8. ZAKLJUČAK

Nakon definisanja i uspostavljanja operativnog rada regiona za koordinisani proračun prenosnih kapaciteta, proračuni bi se radili na regionalnom nivou u okviru RCC-ova na koordinisan način, najpre za dnevni i intradnevni nivo. Primenom metodološkog pristupa zasnovanog na tokovima snage, za svaki element mreže se razmatra i sagledava njegova opterećenost.

Kroz koordinisane proračune zasnovane na tokovima snage u RCC-u, na transparentniji način definisaće se domeni prenosnih kapaciteta, koji će tek nakon berzanskih transakcija pokazati da li postoje i koji su kritični elementi u mreži. Pri proračunima se uzima u obzir ispunjenost uslova 70% na svakom kritičnom elementu iz predefinisane liste ispada. Ovo će predstavljati izazov i za planiranje i za upravljanje u realnom vremenu, kada se kritične situacije sa zagušenjima u mreži moraju otklanjati redišpečingom ili kontratrgovinom, pri čemu oba mehanizma nose finansijske posledice.

Iskustva iz evropskih zemalja koje su već morale da implementiraju pravilo 70% pokazuju da OPS-ovi, u cilju dodele 70% kapaciteta, ulaze u režim u kojem postoje preopterećenja u mreži. Postavlja se pitanje da li je to pravilo *insecurity of 70% rule*. Takođe, ostaju otvorena pitanja da li postoje dovoljni potencijali za kontratrgovinu.

Pri proračunima i validaciji prenosnih kapaciteta uzimaju se u obzir i potencijalne korektivne mere (*remedial actions*), koje u realnom vremenu treba sprovesti kada postoji pitanje njihove izvodljivosti.

U EMS AD sagledana su strukturna zagušenja i u skladu sa njima izrađen je Akcioni plan za otklanjanje

identifikovanih problema u mreži. EMS AD treba da obezbedi godišnje povećanje prenosnih kapaciteta u linearnoj putanji između zona trgovanja do njegove minimalne vrednosti, najkasnije do kraja 2027. godine. Definisanjem Akcionog plana, EMS AD dobija dodatno vreme za potpuno poštovanje MACZT kriterijuma i dodatno jačanje infrastrukture.

LITERATURA

[1] ENERGY COMMUNITY, CLEAN ENERGY PACKAGE, <https://www.energy-community.org/implementation/package/EL.html>

[2] Uredba o uspostavljanju smernica za rad međusobno povezanih sistema za prenos električne energije

[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] Zakon o energetici („Službeni glasnik RS”, br. 145/2014, 95/2018 – dr. zakon, 40/2021 i 94/2024)

[6] Uredba o raspodeli prenosnog kapaciteta i upravljanje zagušenjima („Sl. glasnik RS”, br. 102/2024)

BIOGRAFIJE



Marija Đorđević je rođena 1972. godine u Srbiji. Diplomirala je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 1997. godine. Magistrirala je 2003. godine na istom fakultetu. Doktorirala u oblasti energetike 2013. godine na Univerzitetu u Beogradu. Trenutno je rukovodilac Centra za operativno planiranje i analizu rada prenosnog sistema. Oblasti interesovanja su kratkoročno planiranje i analiza rada, tržišni aspekti i implementacija evropske regulative u EES-u Srbije.



Srđan Mladenović je rođen 1982. godine u Kruševcu, gde je i završio osnovno obrazovanje i gimnaziju. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2010. godine. Već 15 godina zaposlen je u „Elektromreži Srbije”, gde je prošao kompletan razvojni put. Trenutno radi na poziciji rukovodioca Sektora za planiranje i analizu rada prenosnog sistema.



Ivana Stamenić je rođena 1993. godine u Užicu. Osnovno i srednje obrazovanje stekla je u Bajinoj Bašti. Diplomirala je 2016. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Odseku za energetiku. Master akademske studije završila je 2017. godine na istom fakultetu.

Od 2018. godine zaposlena je u „Elektromreži Srbije”, trenutno na poziciji šefa Službe za planiranje rada prenosnog sistema.



Branko Šumonja je rođen 1969. godine. Završio Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, smer Energetika. Od 1998. godine radi u energetske sektoru Srbije, prvo u „Elektroprivredi Srbije”, a nakon toga u „Elektromreži Srbije”, od njenog osnivanja 2005. godine. Prošao je kompletan razvojni put u vezi sa upravljanjem prenosnim sistemom – od dispečera NDC preko raznih nivoa rukovođenja u upravljanju i planiranju rada prenosnog sistema. Trenutno je na poziciji direktora Direkcije za upravljanje prenosnim sistemom.

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



UREĐIVAČKA POLITIKA I TEMATSKE OBLASTI ČASOPISA

Pri ponovnom pokretanju izdavanja časopisa „Elektroprivreda” odlučeno je da on ima naučno-stručni karakter i da bude pripreman i publikovan po novoj, široj koncepciji i dvojezično, na srpskom i engleskom. Pri tome će na engleskom jeziku biti objavljivani samo oni rukopisi za koje autori iz Srbije i regiona iskazu takvu želju, a recenzenti i Uredništvo procene da imaju odgovarajući doprinos i da bi mogli biti od interesa i za čitalačku publiku van srpskog govornog područja. Časopis je, naravno, otvoren i za rukopise stranih autora čiji su originali na engleskom jeziku. Uz saglasnost ovih autora, odobreni rukopisi će biti prevedeni i objavljivani i na srpskom jeziku. Na srpskom jeziku dostupne su ćirilčna i latinična verzija objavljenih članaka.

Časopis se, po pravilu, izdaje dva puta godišnje, isključivo elektronski (*on line*). Časopis je otvorenog pristupa (*Open Access*), pri čemu je objavljivanje prihvaćenih rukopisa besplatno, bez bilo kakvih finansijskih obaveza autora. Sa druge strane, takođe nema ni finansijskih obaveza izdavača prema autorima, kako prijavljenih rukopisa tako i objavljenih članaka.

Sadržaj rukopisa prijavljenog za objavljivanje u Časopisu mora biti originalno delo autorâ i ne sme biti već objavljen ili javno predstavljen (niti objavljen ili predstavljen u međuvremenu, pre prvog objavljivanja u „Elektroprivredi”), bilo gde u svetu, u bilo kom obliku. Ovo pravilo se neće primenjivati na rukopise prijavljene za posebna, specijalna izdanja Časopisa, koja budu posvećena već prezentovanim, izabranim radovima sa partnerskih konferencija, pri čemu takav rukopis mora biti proširen najmanje 30% u odnosu na prezentovani konferencijski rad, unapređen i dodatno recenziran po istoj proceduri kao i rukopisi prijavljeni za redovna izdanja Časopisa.

U Časopisu se objavljuju samo oni rukopisi koji dobiju najmanje dve pozitivne recenzije od strane renomiranih eksperata u oblasti na koju se rukopis odnosi, odnosno većinu pozitivnih recenzija, u slučaju angažovanja većeg broja recenzenata.

Časopis prihvata na razmatranje rukopise i objavljuje radove naučno-istraživačkog i stručnog karaktera, a posebno rukopise/radove u oblastima:

- novih tehnologija za obezbeđivanje, obradu i korišćenje primarnih energenata;
- proizvodnje, prenosa i distribucije električne energije;
- skladištenja i konverzije električne i toplotne energije;
- racionalne potrošnje električne i toplotne energije;
- razvoja obnovljivih izvora energije;
- informacionih i telekomunikacionih sistema;
- organizacije rada elektroenergetskog sistema;
- zaštite životne sredine;
- revitalizacije elektroenergetskih objekata;
- pronalazaštva i inovacija;
- restrukturiranja i privatizacije u energetsom sektoru;
- tržišta električne energije;
- primene pravne regulative Evropske unije u oblasti energetike;
- druge srodne oblasti.

Časopis je zamišljen kao platforma i alat za prikazivanje iskustava, konstruktivno iskazivanje i sučeljavanje stavova, stručne diskusije eksperata iz struke i prakse i iz naučno-istraživačkih institucija i inovativnih centara. Naime, otvorena razmena njihovih mišljenja i iskustava, po pitanjima strateškog razvoja i opredeljivanja za nove tehnologije može doprineti iznalaženju adekvatnih i optimalnih tehničko-tehnoloških, pravno-ekonomskih i organizaciono-poslovnih odgovora na sve izazove dekarbonizacije, digitalizacije i tranzicije elektroenergetike ka održivom razvoju.

U ime Uredništva,

Dr Vladimir Šiljkut
Glavni i odgovorni urednik

KATEGORIZACIJA (RANGIRANJE) RUKOPISA

Prilikom pregleda rukopisa i popunjavanja izveštaja o tome, recenzenti predlažu, a Uredništvo – u slučaju prihvatanja rukopisa za objavljivanje – utvrđuje njegovu kategoriju (rang). Kategorizacija (rangiranje) rukopisa vrši se prema *Pravilniku o kategorizaciji i rangiranju naučnih časopisa* („Službeni glasnik RS”, br. 80/2024 od 4. 10. 2024) i ovde priloženoj tabeli:

Naučni članci:	
Originalni/izvorni naučno-istraživački rad	Rad u kome se iznose prethodno neobjavljivani rezultati sopstvenih istraživanja naučnim metodom
Pregledni rad	Rad koji sadrži originalan, detaljan i kritički prikaz istraživačkog problema ili područja u kome je autor ostvario određeni doprinos
Kratko ili prethodno saopštenje	Originalni naučni rad punog formata, ali manjeg obima ili preliminarnog karaktera
Naučna kritika, odnosno polemika i osvrti	Rasprava na određenu naučnu temu zasnovana isključivo na naučnoj argumentaciji i korišćenjem naučne metodologije
Stručni članci:	
Stručni rad	Prilog u kome se nude iskustva korisna za unapređenje profesionalne prakse, ali koja nisu nužno zasnovana na naučnom metodu
Informativni prilog	Uvodnik, komentar i sl.
Prikaz	Prikaz knjige, računarskog programa, slučaja, naučnog događaja i sl.
Stručna kritika, odnosno polemika i osvrti	Rasprava/diskusija na određenu stručnu temu

UDK: (unos Redakcija)

Prvi A. Autor¹, Drugi B. Autor², Treći C. Autor³, ...

Uputstvo za pripremu radova - naslov rada

(NE VIŠE OD ČETIRI REDA)

¹ Afiliacija prvog autora - institucija, grad, zemlja*² Afiliacija drugog autora - institucija, grad, zemlja (ako se razlikuje od 1)³ Afiliacija trećeg autora - institucija, grad, zemlja (ako se razlikuje od 1,2)

...

DOI: (unos Redakcija)

Kategorija rada: (unos Redakcija)

Ključne poruke

- U najviše četiri kratke stavke/bullets treba izložiti ključne aspekte i poruke rada
- Rečenice ovih stavki moraju biti kratke, jezgrovite, pomoćni glagoli mogu biti izostavljeni
- Npr: Uputstvom sagledani struktura i oblikovanje rada za publikovanje

Kratak sadržaj

Kratak sadržaj rada treba da sadrži sažet opis problema, primenjene metode i zaključke. On je esencijalni deo rada i treba da bude jasan i koncizan. Kratak sadržaj treba da bude informativan, dajući pregled problematike, postupka i glavnih zaključaka, rezultata i njihovog značaja. Ne treba pisati u prvom licu, ne navoditi reference i jednačine i izbegavati skraćenice. Ne treba da sadrži više od 300 reči (na srpskom) do 350 (na engleskom, uključujući i određene i neodređene članove ispred imenica).

Ključne reči

Navesti do maksimalno šest ključnih reči, odvojenih međusobno zapetama

Primljeno: (unos Redakcija) Recenzirano: (unos Redakcija)

Izmenjeno: (unos Redakcija) Odobreno: (unos Redakcija)

*Korespondirajući autor: (ime i prezime, telefon)

E - mail:

1. UVOD

U časopisu „Elektroprivreda” se objavljuju kategorisani članci: originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni i stručni radovi iz oblasti elektroprivrede i energetike.

Svi radovi podležu recenziji. Za originalnost rada, kvalitet i verodostojnost rezultata odgovorni su isključivo autori. Predajom rada autori prihvataju sva pravila navedena u ovom uputstvu.

Ovaj dokument sadrži uputstva za pripremu radova. Mole se autori da se u pripremi radova u potpunosti pridržavaju ovog uputstva kako bi se izbegli problemi pri štampanju rada.

Dokument je uzorak za *Microsoft Word* (verzija 7 i viša) i ujedno je i primer željenog izgleda rada. U njemu su sadržane sve potrebne informacije o formatu rada, tipu i veličini fontova, kao i pravila koja objašnjavaju postupke u vezi sa jednačinama, mernim jedinicama, slikama, tabelama i ostalim delovima rada.

Kompletan rad koji sadrži rukopis, tabele, grafikone, crteže, fotografije i puna imena i prezimena autora sa afilijacijama treba dostaviti postavljanjem onlajn na aplikaciju za rukovanje rukopisima, dostupnu na veb-sajtu Časopisa, <https://epijournal.eps.rs/prijava> ili, alternativno, slanjem na imejl adresu: epijournal.editor@eps.rs.

Obim rada je najviše deset strana (ne računajući spisak literature i naslov, ključne poruke, kratak sadržaj i ključne reči na engleskom jeziku), osim u slučajevima preglednih radova i specijalnih izdanja Časopisa sa proširenim nagrađenim radovima sa konferencija, u kom slučaju broj stranica nije ograničen, ali se preporučuje da bude do 16.

Original rada treba da bude prezentovan u formatu A4 (210x297) mm. Tekst rada treba da bude poravnat po obe margine. Sve margine treba da budu podešene na 2 cm. Tekst rada treba da bude urađen sa *single* proredom. Rad može biti napisan na srpskom ili engleskom jeziku. (Uredništvo odlučuje koji radovi će biti prevedeni i na drugi jezik, kako bi bili dostupni što većem skupu čitalaca.) Veličina fonta za pojedine delove teksta je kao u ovom Uputstvu. U radu treba izbegavati celovita matematička izvođenja. Neophodna izvođenja mogu se dati, po potrebi, kao celine, u vidu jednog ili više priloga.

Ovaj dokument može se direktno preuzeti sa web adrese <https://epijournal.eps.rs> i koristiti kao podloga za pripremu rukopisa, jednostavnim unošenjem delova teksta rada na određena mesta u ovom dokumentu.

Preporuka je da tekst rada počne uvodom u kome se formulišu problem i zadatak rada. Daje se pregled i komentar korišćene literature iz navedene oblasti i ukazuje na poziciju i doprinos rada u odnosu na navedenu literaturu.

2. NASLOV POGLAVLJA (na primer: PRIPREMA TEKSTA)

Radi veće jasnoće tekst rada treba podeliti na poglavlja i potpoglavlja. Poglavlja i potpoglavlja treba numerisati arapskim brojevima, potpoglavlja brojevima razdvojenim tačkom. Naslove poglavlja i potpoglavlja od teksta pre i posle naslova odvojiti jednim praznim redom. Treba

izbegavati prelom teksta na naslovu ili podnaslovu u tekstu.

2.1 Nivoi potpoglavlja

Sa potpoglavljima nije poželjno ići niže od drugog nivoa, na primer 2.1, 3.3 i sl.

2.1.1 Treći nivo potpoglavlja. Dozvoljen je samo izuzetno, ukoliko doprinosi metodološkoj i generalnoj jasnoći teksta rada i piše se, kao i naslovi potpoglavlja, boldiranim malim slovima, ali se završavaju tačkom, nakon koje, u nastavku tog reda i pisana normalnim fontom, počinje prva rečenica tog potpoglavlja.

2.2 Pozicioniranje tabela i grafičkih priloga

Tabele, slike i grafici mogu, po potrebi, da budu u jednoj koloni ili preko obe kolone. Sve slike i tabele treba da budu postavljene u tekst blizu, ali nikako ispred, mesta u tekstu na kome se prvi put pominju. Slike i tabele u prilogima treba da budu označene na isti način kao u tekstu rada.

2.3 Prva strana

Na sredini prve strane navodi se naslov rada *bold* slovima veličine 16, tipa *Times New Roman*. Ispod naslova navode se puna imena i prezimena autora slovima veličine 11. Ispod imena i prezimena navode se afilijacije autora, slovima veličine 10. Posle navođenja podataka o autorima, na prvoj strani se navode ključne poruke rada, rezime rada i ključne reči, slovima veličine 11.

Ukoliko je rad pisan i za objavljivanje odobren samo na srpskom jeziku, posle sadržaja opisanog u prethodnom pasusu, u konačnoj verziji rada za publikovanje navode se i naslov rada, ključne poruke, rezime rada i ključne reči na engleskom jeziku.

Ukoliko je rad pisan na engleskom jeziku i odobren za objavljivanje, u celosti se prevodi i objavljuje i na srpskom jeziku, u identičnom formatiranju.

Ukoliko je rad pisan na srpskom jeziku i odobren za objavljivanje na oba jezika, u celosti se prevodi i objavljuje i na engleskom, u identičnom formatiranju.

U donjem levom uglu prve strane treba dati pune podatke potrebne za ostvarenje kontakta sa prvim autorom rada.

Sve ovo se jednostavno realizuje korišćenjem datog modela prve strane jednostavnim unošenjem predviđenog teksta na za to predviđena mesta u Uputstvu.

2.4 Podnaslov (na primer: Tekst rada)

Tekst rada se jednostavno unosi umesto teksta uputstva u ovaj format unošenjem ili kopiranjem delova teksta koji su urađeni u skladu sa ovim uputstvom na za to predviđene mesta u uputstvu.

2.5 Jednačine

Jednačine treba postaviti na sredinu teksta i numerisati ih arapskim brojevima u malim (okruglim) zagradama uz desnu marginu teksta. Za jednačine treba koristiti

matematički softver (*Microsoft Equation Editor for MS Word* ili *MathType*). Na primer:

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

Jednačine treba odvojiti od teksta pre i teksta posle razmakom od 6 pointa. Simboli koji se koriste u jednačini moraju biti definisani pre nego što se pojave u jednačini ili neposredno posle jednačine. Pozivanje na neku jednačinu u tekstu vrši se navođenjem broja jednačine u maloj zagradi (1). Ako se rečenica počinje pozivom na jednačinu tada koristiti „Jednačina (1) je ...”.

2.6 Tabele

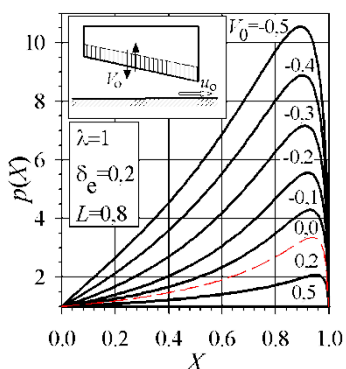
Tabele treba da budu ubačene u tekst na mestima gde se prvi put pominju ili neposredno posle. Treba da budu označene rimskim brojevima, a broj i naziv tabele treba da budu iznad tabele. Na primer:

Tabela I Trajanje simulacija i zauzeće memorije

ISCAS kolo	CPU vreme [s]	zauzeće memorije [MB]
c17	2	3.9
c432	62	68.7
c880	160	152.6
c1355	283	178.8

2.7 Slike

Slike treba da budu brižljivo pripremljene i unesene u tekst na predviđeno mesto. Broj i naziv slike moraju biti ispod slike. Brojeve slika označavati arapskim brojevima. Radi boljeg razumevanja izbegavati prekomerne informacije na slikama. Svi komentari koji se odnose na slike treba da se nalaze u zaglavlju. Kucane oznake treba da budu izabrane pažljivo da bi se obezbedila jasnoća. Pokušati da se ose na slikama opišu i rečima, ne samo simbolima. Na primer, bolje je napisati **vreme t**, nego samo **t**. Oznake za merne jedinice treba staviti u zagrade.



Slika 1. Opis slike

3. ZAKLJUČAK

Iako zaključak treba da sadrži pregled ključnih rezultata rada, u njemu ne treba ponavljati deo naveden u kratkom sadržaju. Zaključak može da objasni značaj rada ili predloži moguće primene ostvarenih rezultata i da smernice za dalja istraživanja problematike tretirane u radu.

ZAHVALNICA

Zahvalnice za sponzorstvo, finansiranje ili pomoć u radu, ako ih ima, treba da budu kao poseban, nenumerisan deo pre spiska literature. U naslovu koristiti jedninu i kada ima više zahvalnica.

LITERATURA

Spisak korišćene literature treba da bude na kraju rada u posebnom, nenumerisanom delu. Reference se numerišu arapskim brojevima u srednjim (uglastim) zagradama, po redosledu citiranja u tekstu rada. Pri navođenju obratiti pažnju na to da reference budu tačne i kompletne, tj. da potpuno opisuju izvore podataka.

Sve navedene reference moraju biti direktno citirane u samom tekstu rada navođenjem broja reference u srednjoj (uglastoj) zagradi. Ne ograničavati se samo na navođenje svojih referenci, već navesti i relevantne reference iz posmatrane oblasti.

U nastavku se daju primeri načina navođenja literature: rad objavljen u časopisu [1], knjiga [2], poglavlje u knjizi više autora [3], rad objavljen u zborniku radova sa konferencije [4] i članak preuzet sa veb sajta [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] Marković Z., „Granična stanja čeličnih konstrukcija prema evrokodu”, Akademska misao, Beograd, 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] Vukić B., „Društvene igre za visokopozicionirane poslovne ljude” [Internet]. Beograd; Novi Sad: Adizes Southeast Europe; 2010 [citirano 19.03.2012]. Dostupno na: <http://www.asee.rs/?page=142&oi=69>

DODATAK (PRILOG) 1

Dodaci, ukoliko su neophodni, treba da budu navedeni posle Literature. Ako ih ima više, treba da budu numerisani arapskim brojevima. U slučaju da prilozi sadrže tabele ili slike, oni se numerišu slovom „A” iza koga sledi tačka i redni broj (i to: za tabele rimski, od „I” nadalje, redom jedinstveno za sve priloge; a za slike arapski, od „1” nadalje, jedinstveno za sve priloge).

DODATAK (PRILOG) 2

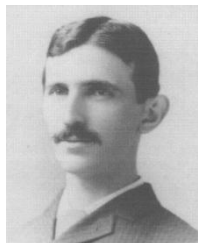
U zavisnosti od njihovog sadržaja, prilozi mogu biti formatirani dvostubačno ili jednostubačno. U slučaju kada to čitaocu omogućava bolju preglednost, slike i tabele u prilogima mogu biti zarotirane ulevo za 90°.

Tabela A.I Naziv prve tabele u Prilogu

Zaglavlje	Kolona 1	Kolona 2	Kolona 3	Kolona 4	Kolona 5	Kolona 6	Kolona 7
Red 1							
Red 2							
Red 3							
Red 4							
Red 5							
Red 6							

BIOGRAFIJE

Treba dati kratku biografiju za svakog autora. Početi imenom i prezimenom autora i dati njegovu kratku, pretežno stručnu biografiju. Treba uključiti i fotografiju autora. Primer biografije je dat u nastavku.



Nikola Tesla je rođen u Smiljanu u Austrijskom carstvu, 9. jula 1856. Završio je Austrijsku politehničku školu u Gracu i studirao na Univerzitetu u Pragu. Njegovo radno iskustvo uključivalo je *American Telephone Company*, Budimpešta, *Edison Machine Works*,

Westinghouse Electric Company i *Nikola Tesla Laboratories*. Njegova posebna polja interesovanja su bile oblasti visokih frekvencija. Tesla je dobio počasne diplome od institucija visokog obrazovanja uključujući Univerzitet Kolumbija, Univerzitet Jejl, Univerzitet u Beogradu i Univerzitet u Zagrebu. Dobio je medalju *Elliott Cresson* Instituta Frenklin i Edisonovu medalju IEEE. Godine 1956. termin *tesla* (T) je usvojen kao jedinica za gustinu magnetnog fluksa u sistemu MKSA. Godine 1975. Elektroenergetsko društvo (*Power Engineering Society*) je ustanovilo nagradu Nikola Tesla u njegovu čast. Tesla je preminuo 7. januara 1943. godine.

ORCID: xxxx-yyyy-zzzz-www.

/ Svaki autor treba da navede svoj ORCID broj (*Open Researcher and Contributor ID*), ukoliko ga poseduje /

Autori su obavezni da Redakciji časopisa, po prihvatanju rada, dostave i potpisanu izjavu o autorstvu, originalnosti rukopisa i prenosu autorskih prava, čiji se obrazac može preuzeti sa sajta Časopisa, <https://epijournal.eps.rs>.

/ Obrisati boks s ovim tekstom pri izradi rada /

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

Prof. dr Vladimir Katić

(1954–2026)

Sa dubokom tugom obaveštavamo čitalačku publiku, autore i saradnike našeg časopisa da nas je posle kraće i kobne bolesti, početkom aprila 2026, napustio predsednik našeg Uređivačkog odbora, profesor doktor Vladimir Katić.

Vladimir Katić je diplomirao 1978. godine na Fakultetu tehničkih nauka (FTN) u Novom Sadu, a magistrirao je 1981. i doktorirao 1991. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Bio je vrhunski naučnik i pedagog, ugledni profesor FTN-a u Novom Sadu, u nekoliko mandata i njegov prodekan.

Tokom svoje impresivne karijere, objavio je preko 600 naučnih radova i 22 monografije i udžbenika. Sa blizu 2100 citata i *h*-indeksom 20 (prema Google Scholar-u), profesor Katić je bio jedan od najuticajnijih istraživača u oblastima energetske elektronike i kvaliteta električne energije, obnovljivih izvora i električnih vozila. Kao recenzent sa više od 500 priznatih recenzija, bio je izuzetno cenjen u uredništvima najprestižnijih svetskih naučnih časopisa.

Profesor Katić je ostavio neizbrisiv trag u naučnoj i stručnoj javnosti. Svojim predanim radom, izuzetnim znanjem i vizijom značajno je doprineo razvoju elektrotehnike, kao i ugledu naše naučne zajednice u svetu. Bio je pokretač i dugogodišnji organizator brojnih naučnih skupova, među kojima se posebno izdvaja konferencija „Energetska elektronika“, zahvaljujući kojoj su naši univerziteti i naši stručnjaci stekli prepoznatljivo mesto na međunarodnoj naučnoj mapi.

Kao Life Member IEEE, profesor Katić je bio oličje doživotne posvećenosti inženjerskoj struci. Do poslednjeg dana bio je aktivan kao Chair IEEE Life Member Affinity Group. Bio je dugogodišnji Chair IEEE Joint Chapter for Industry Applications, Industrial Electronics and Power Electronics (IE-13/IA-34/PEL-35), gde je svojim znanjem, autoritetom i organizacionim sposobnostima spajao nauku i industriju. Od 2006. do 2010. godine bio je predsednik nacionalne sekcije IEEE Srbija i Crna Gora.

Bio je član izvršnih odbora međunarodnih asocijacija poput EPE (Brisel) i PEMC (Budimpešta). Predsedavao je brojnim konferencijama, od kojih se posebno izdvaja EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, koja je Novi Sad i Srbiju postavila u centar svetske energetske elektronike.



UDK: 621.3:929 Katić V.

Poslednji veliki skup iz ove oblasti koji je profesor Katić organizovao i vodio bio je XXIII međunarodni simpozijum o energetske elektronici (Ee 2025), održan od 8. do 10. oktobra 2025. godine u Beogradu i Novom Sadu.

Kao jedan od najistaknutijih stručnjaka u ovoj oblasti, bio je osnivač i predsednik Društva za energetske elektroniku Srbije, predsednik Društva za ETRAN, ulažući svoje znanje, energiju i organizacione sposobnosti u kontinuitet i stalno unapređivanje jedne od najznačajnijih naučnih konferencija u regionu.

Bio je i dugogodišnji predsednik Stručne komisije 2 – *Kvalitet električne energije u elektrodistributivnim sistemima* nacionalnog komiteta CIRED Srbija, čiji je bio osnivač i član njegovog Izvršnog odbora. Dao je ogroman doprinos ovoj oblasti elektroenergetike, radu i razvoju i ovog udruženja i unapređenju nivoa savetovanja koje je ono organizovalo u protekle tri decenije.

Od obnove izdavanja časopisa „Elektroprivreda“, 2023. godine, profesor Katić je bio na čelu Uredništva, dajući veliki doprinos naporima da časopis ponovo bude pokrenut, da zaživi i stalno napreduje. Do svojih poslednjih dana aktivno je učestvovao i u pripremi ovog izdanja, čak ne otkrivajući činjenicu da se bori s opakom bolešću. Utoliko je njegov odlazak bio iznenađujući za sve saradnike, a gubitak teži i nenadoknadiv. Za svakog ko je ikad imao čast i zadovoljstvo da sarađuje sa njim, međutim, i takav njegov stav i podvig su razumljivi, jer su profesora Katića krasile ogromna radna energija, požrtvovanost, posvećenost napretku struke i nauke, a uza sve to i blagost, smirenost, veliko gospodstvo i dostojanstvenost. Na isti način na koji je živio i delao, napustio je ovaj materijalni svet, ostavljajući u njemu trajan trag, a svima koji su ga poznavali – žal i lepe uspomene.

Sa velikim poštovanjem i zahvalnošću,

Uredništvo

U prilogu ovog memorijalnog, kratkog prikaza karijere i dela profesora Vladimira Katića dajemo Izvod iz njegove obimne bibliografije

Izvod iz bibliografije prof. dr Vladimira Katića

Knjige, udžbenici i monografije
(na srpskom jeziku):

1. **Vladimir Katić**, Energetska elektronika 1: Komponente i AC/x pretvarači, univerzitetski udžbenik, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2020, ISBN: 978-86-6022-243-7
2. **Vladimir Katić**, Energetska elektronika 2: DC/x pretvarači i napajajući, univerzitetski udžbenik, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2020, ISBN: 978-86-6022-266-6
3. **Vladimir Katić**, Rešeni zadaci iz Energetske elektronike 1, udžbenik, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2020, ISBN: 978-86-6022-264-2
4. **Vladimir Katić**, Stevan Grabić, Ivan Todorović, Zoltan Čorba, Praktikum iz energetske elektronike, univerzitetski praktikum/udžbenik, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2016, ISBN: 978-86-7892-835-2
5. **Vladimir Katić**, Amir Tokić, Tatjana Konjić, Kvalitet električne energije, knjiga, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007, ISBN: 978-86-7892-064-6
6. **Vladimir Katić**, Izudin Kapetanović, Vangel Fuštić, Obnovljivi izvori električne energije, knjiga, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007, ISBN: 978-86-7892-066-0
7. **Vladimir Katić**, Vlado Porobić, Darko Marčetić, Primena mikroprocesora u energetici: praktikum laboratorijskih vežbi, udžbenik, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2006, ISBN: 86-7892-013-0; 978-86-78920-13-4
8. **Vladimir Katić**, Kvalitet električne energije – viši harmonici: monografija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2002, ISBN: 86-80249-57-2
9. **Vladimir Katić**, Darko Marčetić, Dušan Graovac, Energetska elektronika: praktikum laboratorijskih vežbi, udžbenik, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2000, ISBN: 86-499-0081-X
10. **Vladimir Katić**, Energetska elektronika: zbirka rešenih zadataka, udžbenik, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1987, COBISS-ID: 195530249
11. **Vladimir Katić**, Borislav Pantić, Zbirka rešenih zadataka iz industrijske elektronike, udžbenik, Naučno-obrazovni institut za energetiku i elektroniku, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1980, COBISS-ID: 39513095

Odabrani članci iz međunarodnih časopisa
(od 2000. godine):

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)

Odabrani članci na engleskom jeziku u domaćim i regionalnim časopisima (od 2000. godine):

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]

Izvori podataka za Izvod iz Bibliografije:

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>

Publikacija „Srpski naučnici u energetskej elektronici“, Poglavlje: „Kvalitet električne energije – Međunarodni simpozijum Energetska elektronika – Doprinos profesora Vladimira Katića“, katalog Galerije nauke i tehnike SANU broj 43, SANU, 2020, str. 40-41, Biography and References, link: <http://esp.etf.rs/cvkatic.pdf>

Pripremio:

Dr Vladimir Šiljkut, dipl. inž. el.

