

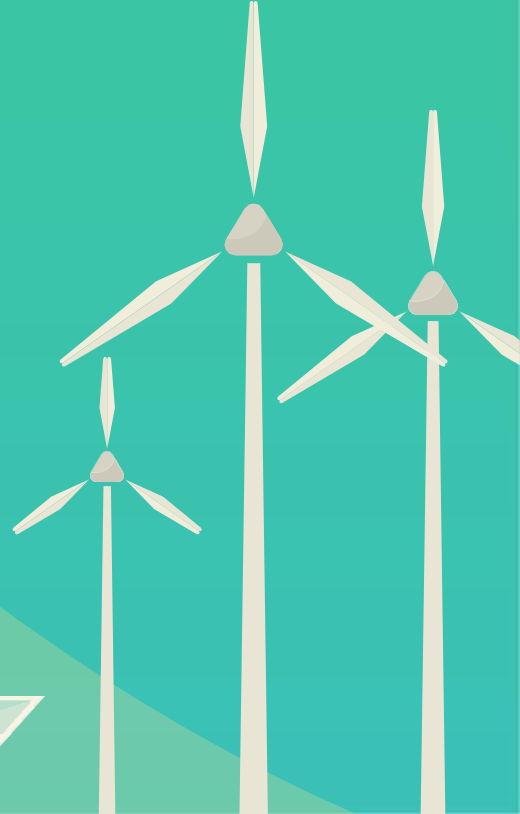
ISSN 0354-8651



List Saveza energetičara
Broj 1 / Godina XXIV / Mart 2022.

energija

| ekonomija | ekologija



energija

| ekonomija | ekologija



Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 1, Mart 2022

Izdavač:

Savez energetičara
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd
e-mail: info@savezenergeticara.org
<http://www.savezenergeticara.org>

Predsednik Saveza energetičara:
prof. dr Nikola Rajaković

Predsednik Skupštine Saveza energetičara:
prof. dr Milun Babić

Glavni i odgovorni urednik:

prof. dr Dušan Gordić, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu

Uređivački odbor i izdavački savet:

prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu
prof. dr Dejan Ivezić, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu
prof. dr Mirka Komatina, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu
prof. dr Željko Despotović, Institut Mihailo Pupin Beograd
prof. dr Petar Đukić, Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu
prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
prof. dr Damir Đaković, Fakultet tehničkih nauka u Novim Sadu
prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
dr Vladimir Šiljkut, JP Elektroprivreda Republike Srbije
prof. dr Jovica V. Milanović, The University of Manchester, Velika Britanija
prof. Vladimir Terzija, Humboldt Fellow, IEEE Fellow, EiC Elsevier IJEPES
prof. dr Adriana Sida Manea, Politehnica University Timisoara, Rumunija
prof. dr Neven Duić, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska
prof. dr Rade Ćirić, University of Agder, Norveška
prof. dr Nataša Markovska, MANU Skopje, Severna Makedonija
dr Stanko Janković, TenneT TSO GmbH, Savezna Republika Nemačka
prof. dr Mirza Kušljagić, Fakultet elektrotehnike, Tuzla, BiH
prof. dr Peter Vrtič, Univerzitet u Mariboru, Slovenija
prof. dr Predrag Popovski, Mašinski fakultet Skopje, Severna Makedonija
dr Ilija Batas-Bijelić, Generalni sekretar Saveza, Institut tehničkih nauka SANU

Priprema, tehnička i jezička obrada:
Savez energetičara

Štamparija:
Mašinac, Kragujevac

Tiraž:
100

UDK
620.9
338:620.9
502:620.9

COBISS.SR-ID 108696839

Časopis izlazi četiri puta godišnje

Radovi su recenzirani uz tehničku obradu. Nijedan deo ove publikacije ne može biti reprodukovano, presnimavano ili prenošeno bez prethodne saglasnosti Izdavača.

Sadržaj

- [01] Ivan VUJOVIĆ, Zoran STOJANOVIĆ, Željko ĐURIŠIĆ
Predlog realizacije razvodnih postrojenja velikih Data Centara /
Implementation Proposal of Substations for a Large Data Centres
- [08] Dunja GRUJIĆ, Miloš KUZMAN
Modeli korišćenja električne energije kupaca-proizvođača / Models of
Prosumers Electricity Usage
- [17] Boban PAVLOVIĆ, Dejan IVEZIĆ, Marija ŽIVKOVIĆ
Izazovi energetske tranzicije u sektoru individualnog grejanja /
Challenges of Energy Transition in the Individual Heating Sector
- [22] Vladan RISTIĆ, Miljan ŽIKIĆ, Dragana VUJANOVIĆ, Ivan TRKULJA,
Ognjen MIJUŠKOVIĆ
Definisanje optimalnog proizvodnog miksa u dekarbonizovanom
energetskom sistemu / Definition of the Optimal Generation Mix in
Decarbonized Power System
- [28] Željko DESPOTOVIĆ, Aleksandar RODIĆ, Ilija STEVANOVIĆ
Sistem napajanja i pametno upravljanje poljoprivrednim zemljištem
korišćenjem obnovljivih izvora energije / **Power Supply System and Smart**
Management of Agriculture Land Using Renewable Energy Sources
- [40] Mileta ŽARKOVIĆ, Vladimir ANTONIJEVIĆ, Aleksandar MILIĆEVIĆ,
Srđan BELOŠEVIĆ
Primena CFD-a i veštačke inteligencije za predikciju sagorelosti i
vremena zadržavanja čestica biomase u reaktoru / Application of CFD
and Artificial Intelligence for Prediction of Biomass Particle Burnout and
Residence Time in the Reactor

- [47] Marko ŠUĆUROVIĆ, Dardan KLIMENTA, Dragan TASIĆ, Bojan PEROVIĆ
Korelacija između strujnog opterećenja i temperature za elektroenergetski kabl instaliran u vertikalnoj PVC cevi / Correlation between Load Current and Temperature for a Power Cable Installed in a Vertical PVC Pipe

- [55] Goran VASIĆ
Šta to povezuje energetska tranziciju i ruralni razvoj u Srbiji? / What Connects Energy Transition and Rural Development in Serbia?

- [60] Miljana TODOROVIĆ, Aleksandar SAVIĆ
Podešavanje usmerenih zemljospojnih zaštita u prenosnoj mreži korišćenjem unapređene metode diferencijalne evolucije / Directional Ground Overcurrent Protection Setting Calculation in Transmission Network by Using Differential Evolution Algorithm

- [68] Siniša SPREMIĆ, Dušan OBRADOVIĆ
Razmatranje gubitaka u niskonaponskim vodovima sa prikazom rezultata proračuna / Consideration of Losses in Low Voltage Lines with a Presentation of Calculation Results

- [74] Đorđe DUKANAC
Analiza uticaja aktivnih delova energetskog transformatora na prostiranje signala od izvora parcijalnih pražnjenja ka UHF davačima / Analysis of the Influence of Active Parts of the Power Transformer on the Propagation of Signals from Source of Partial Discharges to UHF Sensors

- [81] Vojislav SIMOVIĆ, Miroslav ŽERAJIĆ
Procena uticaja integracije solarnih elektrana na niskom i srednjem naponu na smanjenje vrednosti gubitaka aktivne snage u prenosnom sistemu / Impact Estimation of Distributed Generation from Solar Power Plants Connected to the Distribution System on Active Power Losses in the Transmission System

Predlog realizacije razvodnih postrojenja velikih Data Centara

Implementation Proposal of Substations for a Large Data Centres

Ivan Vujović*, Zoran Stojanović**, Željko Đurišić**

* Ericsson AB Štokholm, dio stranog društva Podgorica, Bulevar svetog Petra Cetinjskog 3, 81000 Podgorica, Crna Gora

** Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

Rezime - Veliki Data Centri (DC-i) zahtijevaju značajnu količinu električne energije koja omogućava neprekidno i kvalitetno napajanje opreme i uređaja u objektu. Povezivanje DC-a na Elektroenergetski sistem (EES) vrši se preko razvodnih postrojenja (RP-a). Dobar dizajn postrojenja i njihovog povezivanja, pravilno dimenzionisanje opreme, sistema zaštite, kao i mogućnost nadzora, odnosno upravljanja nad opremom RP-a osnov su za postizanje visoke pouzdanosti i redundanse u napajanju električnom energijom. Rad je podijeljen u tri dijela. U prvom dijelu je dat predlog realizacije RP-a različitih naponskih nivoa. Opisane su komponente i uređaji koji čine ova postrojenja, kao i njihove međusobne veze. Drugi dio se odnosi na sistem zaštite transformatora, sabirnica i vodova. Poseban naglasak je na nadzoru i upravljanju uređajima i sistemima postrojenja koji su opisani u trećem dijelu rada. U elektroenergetskom dijelu dat je predlog realizacije 2N + 1 sistema redundantnog napajanja DC-a iz EES-a. Izazov za rešenje sistema zaštite je omogućiti isključivanje jednog, ili nekoliko, od velikog broja transformatora u slučaju kvara tako da na svim naponskim nivoima, preostali transformatori ostanu u funkciji, bez prekida. Opterećenje jednog ili više transformatora koji su u kvaru i isključeni sa sabirnica podjednako preuzimaju funkcionalni transformatori. Pri pojavi kvara na jednoj ili sistemu sabirnica, potrebno je omogućiti neprekidno napajanje DC-a preko funkcionalnih sistema sabirnica. Oprema u postrojenjima je povezana na centralizovani sistem nadzora i upravljanja (SNU) realizovan prema IEC 61850 standardu i Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP) arhitekturi. U radu je dat pregled protokola standarda IEC 61850 i TCP/IP steka koji se koriste za realizaciju SNU. Na kraju je dato viđenje budućeg razvoja automatizacije i primjena vještačke inteligencije u RP-a.

Ključne reči - Data Centar, razvodno postrojenje, zaštita, nadzor, upravljanje

Abstract - Large Data Centers (DCs) needs significant energy that enables uninterruptible and quality power supply for equipment and devices in the building. Connection between DC and Power System (PS) is realized through substations (SSs). Good design of SSs and connections between them, proper equipment dimensioning as well as enabling supervising and management of equipment in SSs are basis for achieving high reliability and redundancy in electrical energy power supply. The paper is divided in three parts. In the first part is given a proposal for SSs realization for different voltage levels. There are described

components and devices of which SSs are composed and connections between them. Second part refers to protection systems for transformers, busbars and power lines. Special emphasis is on supervision and management for SSs equipment and systems that are described in the third part of paper. In the electrical power part the proposal for a 2N + 1 design of the redundant power supply for DC from PS is given. Challenge for protection system is to enable switch-off one or a few in the many transformers in the case of failure so that on all voltage levels, remaining transformers stay functional without interruption. Functional transformers equally take over the power load of one or more transformers that are in malfunction and turn off from busbars. In the case when one busbar or a busbar system is in fault, it is necessary to enable uninterruptible power supply of the DC through functional busbar systems. Substations equipment is connected to centralized supervisory and management system (SMS) realized according to IEC 61850 standard and Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP) architecture. The paper provides a brief view of protocols in IEC 61850 standard and TCP/IP stack that are used in the SMS design. A vision of future automation development and application of artificial intelligence in SSs is presented at the end of the paper.

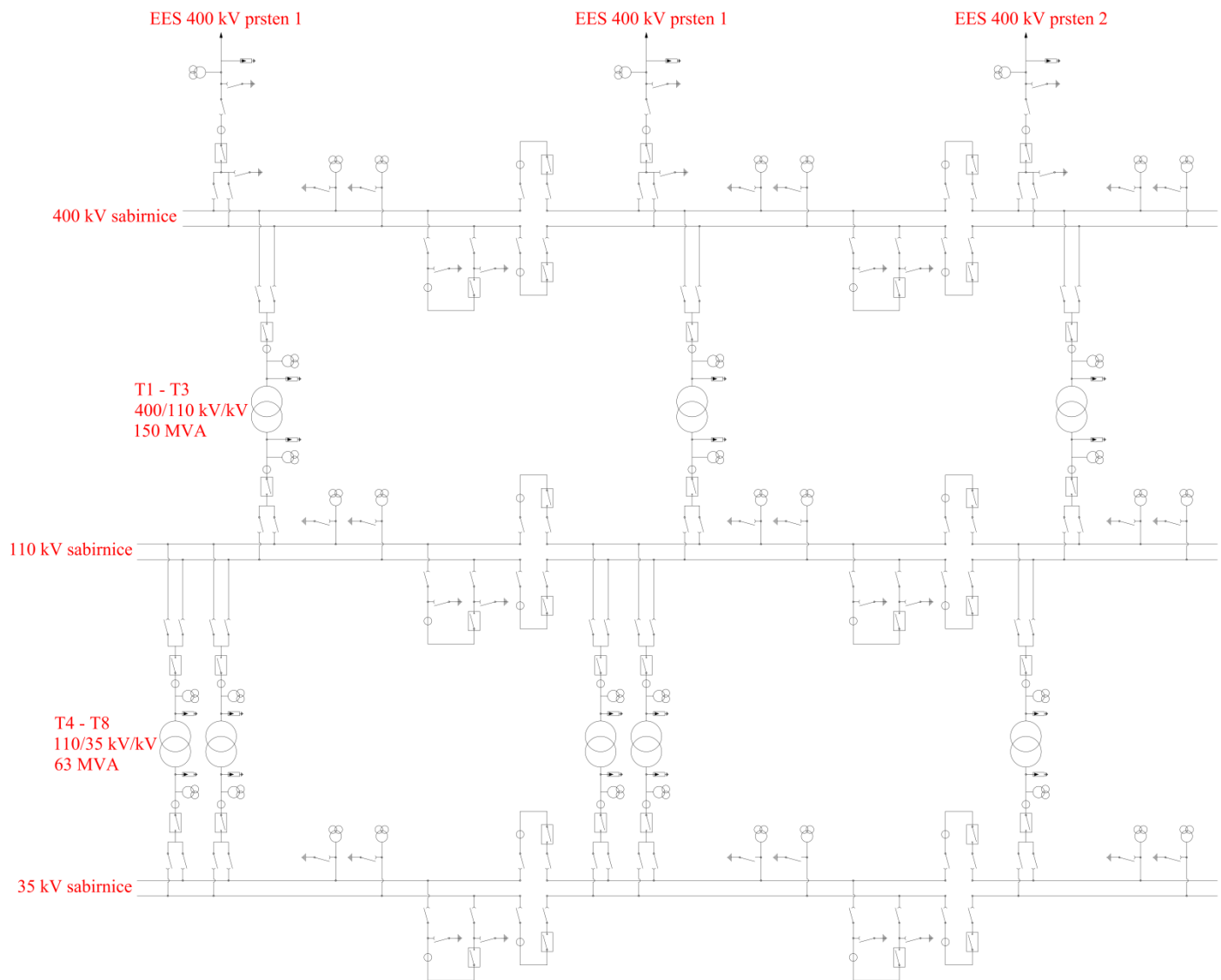
Index Terms - Data Centre, Substation, Protection, Supervision, Management

I UVOD

Na osnovu proračuna objavljenih u [1] koji se odnose na idejno rešenje regionalnog DC-a kod Beograda (u daljem tekstu DC-a), za navedeni dizajn, izračunata je potrebna instalisana snaga napajanja objekta i opreme, odnosno uređaja u njemu koja iznosi: 80 MW (100 MVA, pri $\cos\varphi=0,8$) što je osnovno polazište za realizaciju RP-a preko kojih se vrši snabdjevanje DC-a električnom energijom, odnosno povezivanje DC-a na EES. Važan uslov implementacije napajanja DC-a je obezbjeđivanje neprekidne redundanse na svim naponskim nivoima, počevši od opreme u objektu pa do prenosne mreže EES-a (od 0,4 kV do 400 kV). Drugi važan uslov je pravilan izbor i podešavanja svih potrebnih sistema zaštite uređaja u RP-ma. Treći uslov je ostvarivanje mogućnosti neprekidnog nadzora i upravljanja opremom i uređajima u RP-ma preko integrisanog centralizovanog sistema [2]. Predlog zadovoljenja navedena tri uslova je tema ovog rada. U svakom trenutku, opremi i uređajima

unutar objekta DC-a mora biti obezbijedeno redundantno napajanje u konfiguraciji 2N+1 gdje je N broj transformatora, odnosno izvora napajanja. Napajanje se vrši sa dvije grane čija pojedinačna instalisana snaga nije manja od ukupne instalisane snage DC-a i jednom granom čija je snaga jednaka snazi jednog transformatora na svakom naponskom nivou (1 u relaciji $2N + 1$). Neophodno je obezbijediti i adekvatnu zaštitu opreme, odnosno uređaja DC-a, kao i zaštitu, transformatora, sabirnica i vodova

RP-a od svih neregularnih stanja. U slučaju potrebe za kratkotrajnim ili dugotrajnim isključenjem jednog ili više elemenata ili cijelog RP-a, napajanje DC-a mora biti neprekidno nastavljeno preko redundantnih elemenata, odnosno djelova RP-a. Oprema i uređaji, odnosno sistemi zaštite u okviru svih RP-a, povezuju se preko računarske mreže na SNU. Hardverska i softverska realizacija komunikacije se ostvaruje prema IEC 61850 standardu i TCP/IP arhitekturi.



Slika 1. Principalska šema realizacije razvodnih postrojenja Data Centra naponskih nivoa od 400 kV do 35 kV

II REALIZACIJA ENERGETSKOG DIJELA RAZVODNIH POSTROJENJA

Navedeni objekat DC-a napaja se sa EES-a preko RP-a 400 kV/110 kV, 110 kV/35 kV i 35 kV/0,4 kV. Specifičnost u realizaciji napajanja ogleda se u tome što je potrebno ostvariti 2N+1 redundantni sistem. U osnovi to je rešenje gdje N transformatora na jednom naponskom nivou minimalno

omogućava uvijek dostupnu instalisanu snagu DC-a, dok je drugih N transformatora (ukupno 2N) redundantno i u normalnom pogonskom stanju približno podjednako dijeli opterećenje sa prvih N transformatora. Tome je dodat još jedan transformator iste snage kao i svaki od 2N na tom naponskom nivou. U slučaju kvara, odnosno nenormalnog pogonskog stanja, zavisno od elementa na kom se desio, isključuje se transformator, sabirnice

ili vod, a u najgorem slučaju i svih N transformatora, odnosno dvostrukih sabirnica i jedan 400 kV vod, dok se napajanje DC-a nastavlja preko N preostalih transformatora. Dodatni transformator na svakom naponskom nivou služi kao zamjena za transformator koji je u kvaru.

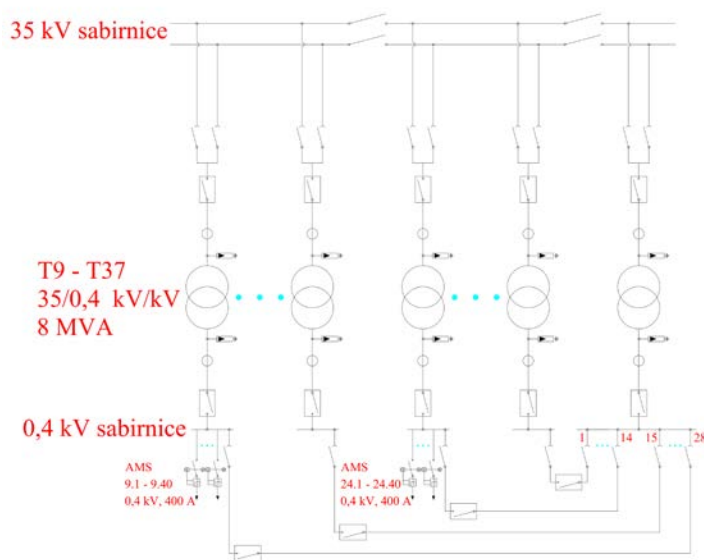
Slike u ovom poglavlju ne prikazuju blok šeme RP-a već principska rešenja. Na slici 1 prikazana je principska šema realizacije predloženog rešenja RP-a DC-a od naponskog nivoa 400 kV do nivoa 35 kV. Prvi nivo transformacije je 400 kV/110 kV. Transformatori T1 i T2 povezani su na 400 kV prsten 1 EES-a. U normalnom pogonu T1 i T2 prenose električnu energiju sa različitih sabirnica dvostrukog sistema i na primaru i na sekundaru. Transformator T3 povezan je na prsten 2 EES-a. U normalnom pogonu, ovaj transformator ne prenosi električnu energiju za napajanje DC-a. Za slučaj kvara na jednom od transformatora T1 ili T2 ili nekom od 400 kV vodova, funkcionalni transformator preuzima opterećenje tako što se svi potrošači (transformatori prvog nižeg nivoa transformacije) povežu na funkcionalni transformator, dok se ne uključi transformator T3 kada se opterećenje približno ravnomjerno raspoređuje između funkcionalnog i transformatora T3. Snaga svakog pojedinačnog transformatora je dovoljna da podnese ukupno instalisano opterećenje DC-a.

Za transformaciju 110 kV/35 kV predviđeno je ukupno 5 transformatora iste snage, pri čemu su oni razdvojeni po grupama. Prvu grupu čine dva transformatora (T4 i T5) koji se napajaju sa transformatora T1, drugu grupu čine transformatori T6 i T7 koji se napajaju sa transformatora T2, dok je transformator T8 zaseban i u normalnom pogonu ne prenosi električnu energiju za napajanje DC-a. Kada se desi kvar na bilo kom od transformatora od T4 do T7, transformator T8 preuzima opterećenje nefunkcionalnog transformatora. Ukupna snaga grupe od dva transformatora dovoljna je da samostalno podnese opterećenje DC-a, dok je snaga transformatora T8 takva da može adekvatno preuzeti opterećenje samo jednog od transformatora u grupi.

Na slici 2 prikazan je predlog rešenja RP-a 35 kV/0,4 kV. Naponski nivo 35 kV izabran je zbog smanjenja broja transformatora u odnosu na 10 kV nivo jer se transformatori 35 kV/0,4 kV serijski proizvode za znatno veće snage nego transformatori 10 kV/0,4 kV. Transformatori su podijeljeni u 4 grupe. Grupe se napajaju sa po jednog od 4 110 kV/35 kV transformatora. U jednoj grupi, na osnovu snage pojedinačnih transformatora, predviđeno je 7 transformatora. Ukupno, u svim grupama, to je: $4 \times 7 = 28$ transformatora (T9 – T36). Transformator T37 u normalnom pogonu ne prenosi električnu energiju za napajanje DC-a. U slučaju pojave kvara na bilo kom od 28 transformatora u bilo kojoj grupi, ovaj transformator preuzima opterećenje nefunkcionalnog transformatora. Ukupna snaga dvije grupe transformatora je dovoljna za napajanje DC-a pri instalisanom opterećenju, dok je snaga transformatora T37 takva da može preuzeti opterećenje samo jednog iz grupe transformatora.

Na 0,4 kV naponskom nivou predviđena je implementacija automatskih motornih sklopki (AMS) za pojedinačne uređaje i opremu u objektu DC-a. Na sekundar svakog 35 kV/0,4 kV transformatora, u razvodnim ormarima, je povezano 40 sklopki od po 400 A. Preko ovih sklopki napajaju se UPS i ispravljački sistemi, sistemi klimatizacije, ventilacije i ostali pogoni u objektu DC-a. Svaki od navedenih sistema povezan je sa dvije napojne grane pri čemu su te napojne grane, na svim naponskim nivoima, nezavisne jedna od druge. Na primjer, granu 1 nekog od navedenih sistema čine transformatori: T1-T4-T9 i AMS 9.1, a granu 2 istog sistema čine transformatori: T2-T6-T23 i AMS 24.1. Telekomunikacioni i serverski uređaji koji se smještaju u rekovima napajaju se sa UPS ili ispravljačkih sistema. Ti uređaji bi trebalo da imaju minimalno 2 napojna modula koji se povezuju na različite sisteme napajanja povezane na različite napojne grane. Uređaji koji sadrže motore napajaju se direktno sa mreže (bez UPS ili ispravljačkih sistema). Unutrašnje klima jedinice trebaju imati dva kompresorska elementa po jedinici koji se napajaju sa različitih napojnih grana.

Primarna uloga opisanih postrojenja je obezbjeđivanje električne energije za napajanje DC-a, međutim to ne znači da dodatni transformatori (1 u izrazu $2N+1$), na svim naponskim nivoima, kada nisu u funkciji napajanja DC-a, ne mogu biti upotrijebljeni za napajanje drugih potrošača. Takođe, sama postrojenja, na svim naponskim nivoima, mogu biti dio nekih većih postrojenja. U toku normalne eksploatacije postrojenja, $2N$ transformatora se koristi za napajanje DC-a preko dvije grane pri čemu je opterećenje raspodijeljeno približno jednako za svaku granu napajanja. U tom slučaju se koristi manje od 50% instalisane snage pojedinačnih transformatora. Ostatak do 50% instalisane snage transformatora može se koristiti za napajanje drugih potrošača. Dodatni transformatori koriste se samo za napajanje drugih potrošača. Pri nastanku havarijskih stanja koja se odlikuju ispadom napajanja preko jedne grane od N transformatora po naponskom nivou, redundantnih N transformatora preuzimaju ulogu napajanja kompletnog DC-a. U tom slučaju se koristi manje od 100% instalisane snage pojedinačnih transformatora samo za napajanje DC-a. Ako se u toku havarijskih stanja desi da jedan od redundantnih N transformatora, na bilo kom naponskom nivou, prestane da funkcioniše, dodatni transformator tog naponskog nivoa preuzima njegovu ulogu tj. ulogu napajanja DC-a jer je to



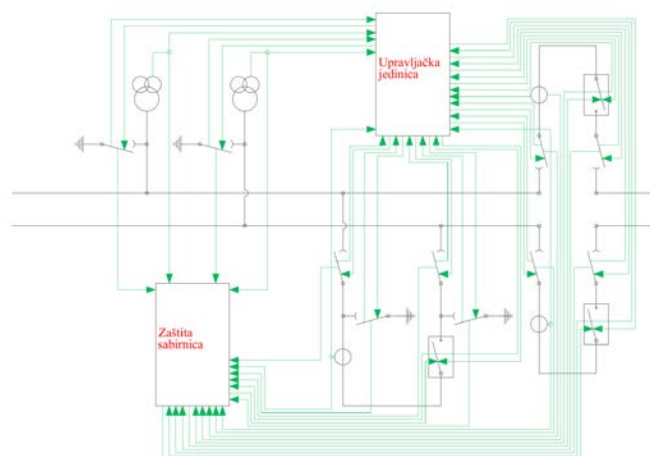
Slika 2. Principsko rešenje razvodnog postrojenja 35 kV/0,4 kV

prioritet u odnosu na napajanje drugih potrošača.

III REALIZACIJA SISTEMA ZAŠTITE

Sistem zaštite odnosi se na transformatore, sabirnice i vodove. Na slikama u ovom poglavlju nisu prikazane blok šeme zaštite i upravljanja već principiska rešenja. Uređaji zaštite i upravljanja su imenovani na osnovu internih standarda Elektromreže Srbije (EMS).

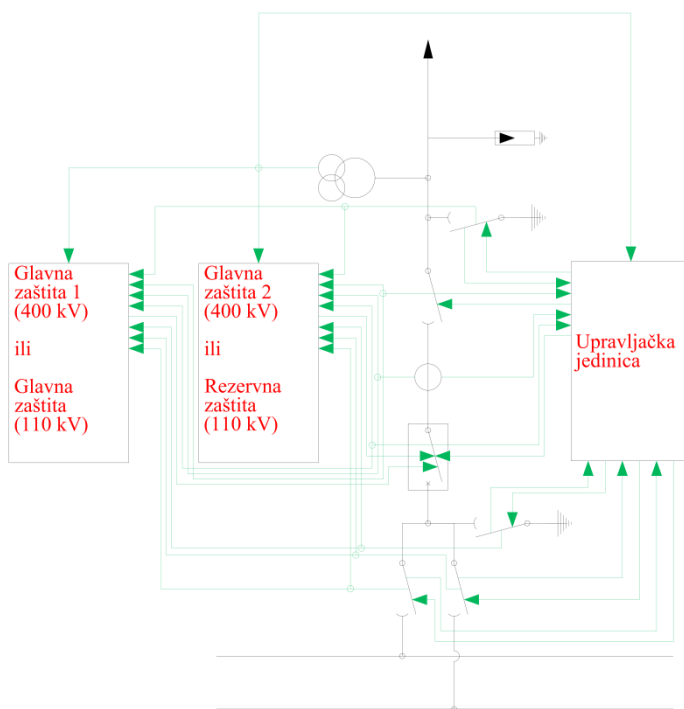
Slika 3 prikazuje principsko rešenje sistema zaštite transformatora na prenosnim naponskim nivoima (400 kV i 110 kV). Realizacija zaštite za transformatore čija je snaga veća ili jednaka 150 MVA (u ovom slučaju za 400/110 kV/kV transformatore) ostvaruje se iz više djelova i to kao: glavna zaštita 1, glavna zaštita 2 i dopunska zaštita. Glavna zaštita 1 se smješta na visokonaponskoj strani, a glavna zaštita 2 i dopunska zaštita na niskonaponskoj strani. Za transformatore čija je snaga manja od 150 MVA (u ovom slučaju za 110/35 kV/kV transformatore) zaštita se realizuje iz dva dijela tj. glavne zaštite i rezervne zaštite. Oprema obje zaštite se smješta na visokonaponskoj strani. Način realizacije pomenutih



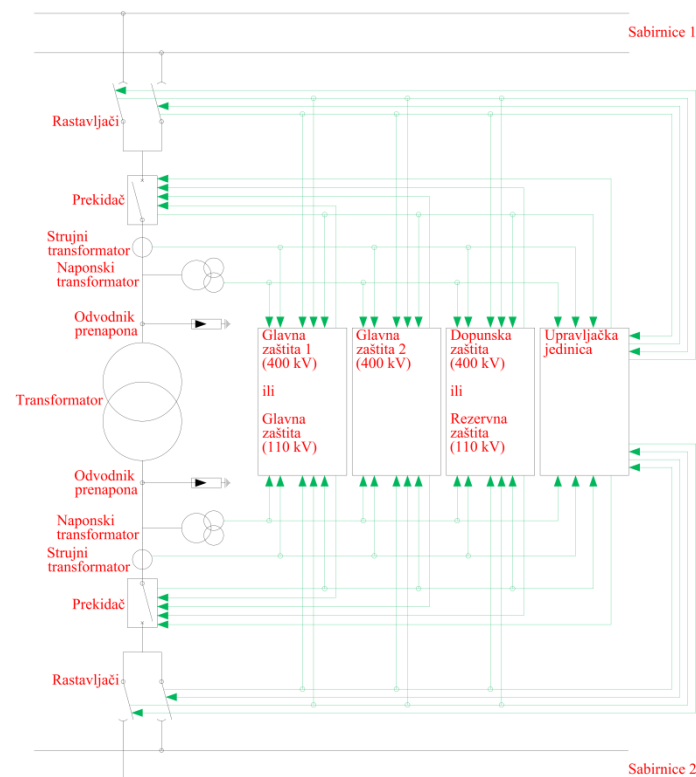
Slika 4. Principsko rešenje zaštite sabirnica

Slika 5 prikazuje sistem zaštite vodova na prenosnim naponskim nivoima. Realizacija zaštite za vodove naponskog nivoa 400 kV ostvaruje se preko glavne zaštite 1 i glavne zaštite 2 [5]. Za vodove naponskog nivoa 110 kV, realizacija zaštite se vrši upotrebom glavne i rezervne zaštite prema [6].

Zaštita transformatora, sabirnica i vodova na distributivnim naponskim nivoima (u ovom slučaju na 35 kV) vrši se na način kako je opisano u [7].



Slika 5. Principsko rešenje sistema zaštite vodova



zaštita opisan je u [3].

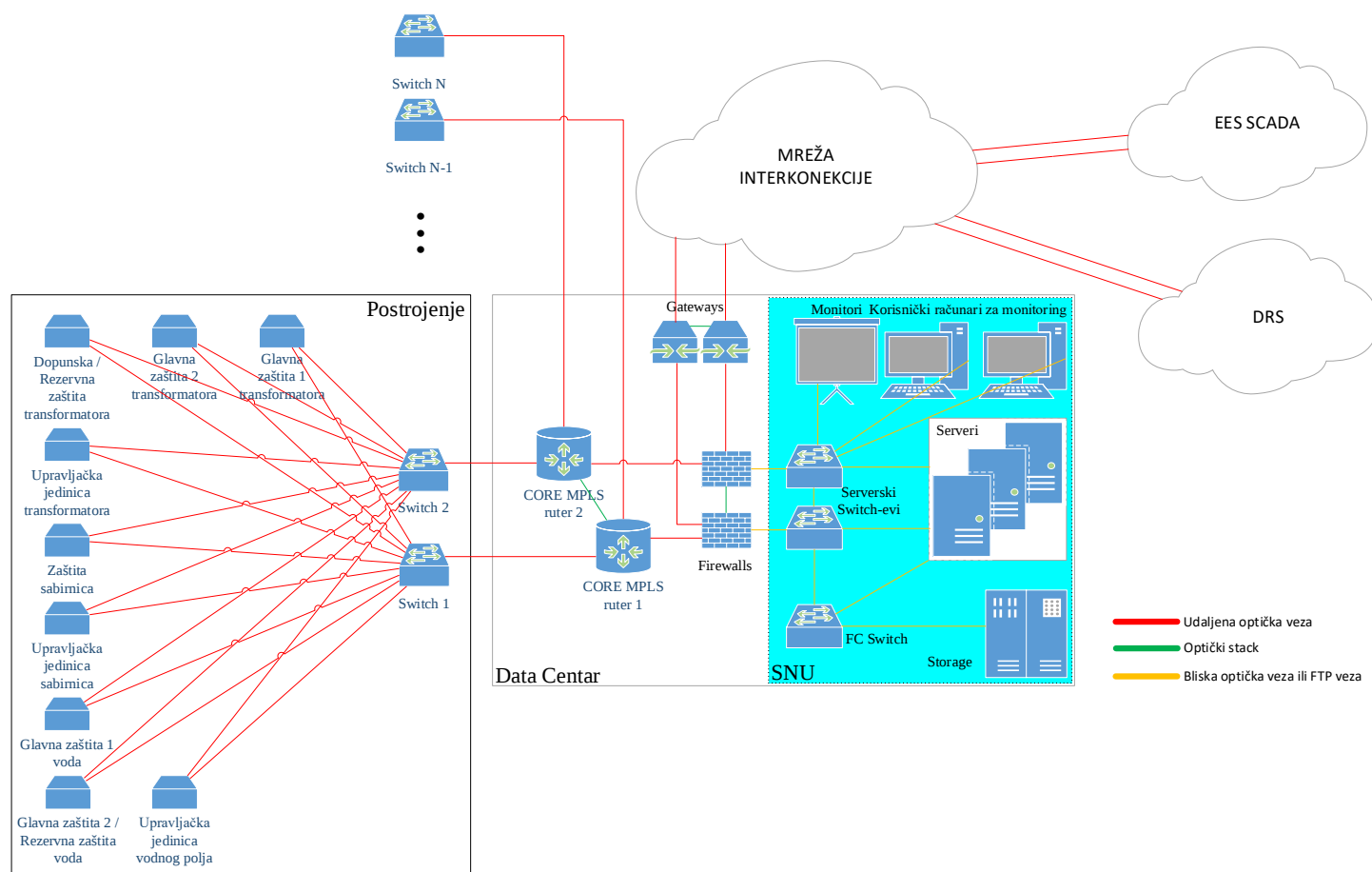
Slika 3. Principsko rešenje sistema zaštite transformatora

Principsko rešenje zaštite sabirnica dato je na slici 4, a realizacija se vrši kako je opisano u [4].

IV REALIZACIJA SISTEMA NADZORA I UPRAVLJANJA

Svaki relej i upravljačka jedinica koji predstavljaju Intelligent Electronic Devices (IEDs) smještaju se u spoljne ormare instalirane neposredno pored opreme RP-a. Komunikaciono povezivanje ovih uređaja sa SNU vrši se preko redundantnih lokalnih telekomunikacionih uređaja tj. switch-eva. Ovi uređaji mogu biti smješteni u istim ormarima kao i IED kada se implementiraju tzv. industrijski switch-evi ili u rekovima unutar objekta DC-a kada su switch-evi bez posebnih zaštita. Povezivanje se vrši isključivo optičkim konekcijama i to kako je prikazano na slici 6. Na svakom IED postoje minimalno dvije Network Interface Card (NIC) sa optičkim portovima preko kojih se ovi uređaji povezuju na dva različita switch-a. Dalje se switch-evi koncentrišu na CORE MultiProtocol Label Switching (MPLS) [8] rutere. Ovi uređaji su smješteni u rekovima objekta DC-a i centralna su tačka povezivanja distribuiranih switch-eva tj. switch-eva u komunikacionim ormarima sa SNU.

Sam SNU podijeljen je na dva dijela. Prvi je sistem za obradu i skladištenje informacija, odnosno slanje komandi IED, a drugi za prikazivanje obrađenih informacija. U okviru prvog dijela SNU realizovan je SCADA sistem DC-a koji nije tema ovog rada. Upravljanje i nadzor nad postrojenjima DC-a treba omogućiti i za SCADA sistem EES-a i za Disaster Recovery Site (DRS) što se postiže povezivanjem sa ovim instancama preko interkonektivne mreže koja može biti u vlasništvu provajdera DC-a ili se, upotrebom Virtual Private Network (VPN) tehnologije [9], koriste mreže telekomunikacionih provajdera. Redundansa, u telekomunikacionom smislu, se postiže izborom dvije različite tačke pristupa interkonektivnoj mreži (po mogućnosti pristup različitim optičkim prstenovima), preko mreža različitih provajdera ili upotrebom različitih tehnologija prenosa informacija preko iste mreže, kako sa strane DC-a tako i sa strane EES-a, odnosno DRS-a.



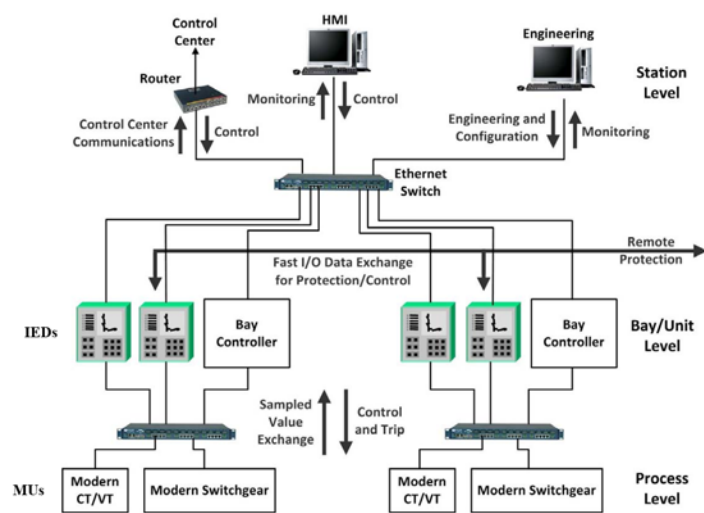
Slika 6. Telekomunikaciona mreža sistema nadzora i upravljanja razvodnim postrojenjima

Prenos informacija između električne opreme RP-a i SNU vrši se prema IEC 61850 standardu [10] i TCP/IP arhitekturi [11]. Na slici 7 prikazana je struktura IEC 61850 standarda [12]. Analogne kontinualne informacije iz uređaja Process Level (PL-a) tj. vrijednosti pojedinačnih parametara (napona, struje, fazne razlike) sa naponskih i strujnih transformatora, odnosno optičkih i elektronskih senzora napona i struje, kao i statusne informacije

(stanje prekidača, rastavljača i td.) šalju se u Merging Units (MUs) gdje se vrši sakupljanje i digitalizacija podataka. Fizički se MU smještaju u okviru posebnih ormara, neposredno pored opreme RP-a, ili u okviru IED ormara. U oba slučaja MU koji pripadaju PL-u i IED koji pripadaju Bay Level (BL-u) su povezani procesnom magistralom koja se realizuje preko Ethernet mreže. Definisan periodični prenos informacija o

vrijednostima parametara preko procesne magistrale realizuje se upotrebom Sampled Measured Values (SMV) protokola [13]. Prenos indikacije prethodno definisanog događaja (signal za isključenje, isključenje prekidača i td.) do IED vrši se upotrebom Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) protokola [13]. Ovaj protokol se upotrebljava i za izvršenje komandi na uređajima PL-a.

I SMV i GOOSE su protokoli nivoa linka. Podaci se prenose multicast putem u okviru Ethernet frejmova. Samo IED koji prepoznaje multicast poruku reaguje na njen sadržaj, dok ostali IED odbacuju frejmove. Maksimalno dozvoljeno vrijeme kašnjenja u obradi i prenosu frejmova SMV protokola je 4 ms, a GOOSE 3 ms i to zbog važnosti što bržeg prenosa informacija o događajima i procesiranja dobijenih informacija od strane IED. Malo kašnjenje je omogućeno upotrebom Virtual Local Area Network (VLAN) klasifikacije i prioritizacije saobraćaja [14].



Slika 7. Struktura IEC 61850 standarda [12]

Komunikacija između IED i SCADA ostvaruje se upotrebom Manufacturing Message Specification (MMS) protokola [13] koji je definisan standardom: ISO 9506. Ovaj protokol je nivoa aplikacije i funkcioniše prema klijent-server (SCADA-IED) arhitekturi. Segmenti podataka se prenose upotrebom TCP-a [15]. Osnovna primjena je u slanju izvještaja i logova. Takođe se koristi za kontrolu i konfiguraciju IED. Prenos podataka nije osjetljiv na vremenska kašnjenja (očekivano kašnjenje je do 100 ms).

Protokoli iz TCP/IP steka koji se koriste za komunikaciju u okviru digitalnih trafostanica su:

- Simple Network Time Protocol (SNTP) [16] koji omogućava vremensku sinhronizaciju IED uređaja sa centralnom vremenskom instancom u mreži. Precizno vrijeme nastanka i evidentiranja događaja u RP-ma je bitno zbog pravovremene reakcije,
- Internet Control Message Protocol (ICMP) [17] služi za periodičnu provjeru dostupnosti IP adrese IED preko Packet InterNet Groper (PING) servisa. Na ovaj način se otkriva potencijalna nefunkcionalnost uređaja ili NIC dijela uređaja,

- Simple Network Management Protocol (SNMP) [18] je baziran na primjeni Management Information Base (MIB) [19] i prijemu SNMP, odnosno SNMP trap poruka za svaki IED uređaj. Sadržaj ovih poruka čine podaci o mjerenjima parametara i stanju opreme na PL-u, kao i stanju samih IED.

Osim navedenih protokola, koristi se i Parallel Redundancy Protocol (PRP) [20] koji je definisan u okviru IEC 62439-3 standarda, a odnosi se na dupliranje paketa informacija i slanja preko dvije paralelne, fizički odvojene, putanje sa ciljem postizanja visoke pouzdanosti prenosa.

V ZAKLJUČAK

Predloženo rešenje RP-a za napajanje objekta velikog DC-a opisuje način realizacije elektroenergetskog dijela sa 4 naponska nivoa i opremom koja obezbjeđuje 2N+1 redundansu u snabdijevanju električnom energijom od najvećeg do najnižeg napona. Sistem zaštite se odnosi na transformatore, sabirnice i vodove. Principski je sličan za sve naponske nivoe. Uključuje glavne zaštite, rezervnu i dopusku zaštitu. Sistem nadzora i upravljanja RP-ma, odnosno opremom koja ih čini dizajniran je prema IEC 61850 standardu i TCP/IP arhitekturi. Osnovne komponente sistema su podijeljene u tri nivoa. Predočeni su protokoli u komunikaciji između nivoa i funkcije koje svaka od komponenti pojedinačno obavlja. Za komunikaciju između uređaja PL i BL koriste se protokoli nivoa linka, a podaci su integrisani u Ethernet frejmove. Zbog toga, kao i zbog upotrebe VLAN tehnologije, odnosno prioritizacije saobraćaja, postiže se smanjenje kašnjenja u prenosu i obradi informacija što omogućava pravovremni prijem podataka i preduzimanje adekvatnih aktivnosti. Aplikativni protokoli: MMS (ISO standard) i SNMP (TCP/IP stek) imaju slične funkcije i mogu se koristiti u isto vrijeme, kao neka vrsta informacione redundanse. Sve izraženija upotreba telekomunikacionih i računarskih tehnologija kao i primjena naprednog računarskog hardvera i softvera u elektroenergetici omogućuje realizaciju tzv. pametnih uređaja tj. opreme u RP-ma koja, preko embeded computers, ostvaruje mrežnu komunikaciju direktno sa SCADA-om kao dijelom SNU-a čime će MU i IED uređaji postati suvišni. Sa druge strane, ta oprema će direktno primati informacije o vrijednostima parametara i stanjima opreme od senzora i izvršavati komande pomoću aktuatora. Standardizacija načina komunikacije tj. upotreba tačno određenih, definisanih, jedinstvenih protokola omogućuje široku primjenu ovakvih rešenja.

Praćenje vrijednosti parametara i promjene stanja opreme sa velikom rezolucijom (velikim brojem podataka u malom vremenskom intervalu), na nivou ms, omogućava implementaciju centralizovanih i distribuiranih neuralnih mreža, odnosno sveobuhvatnu primjenu vještačke inteligencije u cilju predviđanja događaja u RP-ma.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Vujović, I., Đurišić, Ž., Idejno rešenje regionalnog Data Centra kod Beograda napajanog iz obnovljivih izvora energije, Energija, Ekonomija, Ekologija, Vol. 23, No. 3, pp. 10-17, 2021. <https://doi.org/10.46793/EE21-3.10V>
- [2] Vujović, I., Šošić, D., Đurišić, Ž., Integrisani sistem za monitoring i upravljanje Data Centra napajanog iz obnovljivih izvora energije, Energija,

- Ekonomija, Ekologija, Vol. 23, No. 3, pp. 18-27, 2021.
<https://doi.org/10.46793/EEE21-3.18V>
- [3] AD „Elektromreža Srbije“ Beograd, Interni standard IS-EMS 703:2018 Zaštita energetskih transformatora, Beograd, Republika Srbija, 2018.
- [4] AD „Elektromreža Srbije“ Beograd, Interni standard IS-EMS 739:2018 Zaštita sabirnica i spojnih polja visokonaponskih postrojenja, Beograd, Republika Srbija, 2018.
- [5] AD „Elektromreža Srbije“ Beograd, Interni standard IS-EMS 731:2018 Zaštita vodova 400 kV, Beograd, Republika Srbija, 2018.
- [6] AD „Elektromreža Srbije“ Beograd, Interni standard IS-EMS 712:2018 Zaštita vodova 220 i 110 kV, Beograd, Republika Srbija, 2018.
- [7] Operator distributivnog sistema „EPS Distribucija“ d.o.o Beograd, *Pravila o radu distributivnog sistema*, Beograd, Republika Srbija, 2017.
- [8] Ghein L.D., *MPLS Fundamentals*, Cisco Press, Indianapolis, Indiana, USA, 2007.
- [9] Pepelnjak I., Guichard J., *MPLS and VPN architectures*, Cisco Press, Indianapolis, Indiana, USA 2002.
- [10] Mackiewicz R. E., Heights S., Overview of IEC 61850 and Benefits, in Proc. 2nd IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, Georgia, USA, pp. 623-630, 29.10-01.11 2006.
<https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296392>
- [11] Socolofsky T., Kale C., A TCP/IP Tutorial, RFC 1180, IETF Network working group, January 1991. <https://doi.org/10.17487/RFC1180>
- [12] Mohagheghi S., Tournier J. C., Stoupis J., Guise L., Coste T., Andersen C. A., Dall J., Applications of IEC 61850 in distribution automation, in Proc. 4th IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, Arizona, USA, pp. 1-9, 20-23 May 2011.
<https://doi.org/10.1109/PSCE.2011.5772491>
- [13] Liposchak R. and C15 Working group, IEEE Recommended Practice for Implementing an IEC 61850-Based Substation Communications, Protection, Monitoring, and Control System, in Proc. IEEE Power and Energy Society, IEEE Std 2030.100™-2017, New York, USA, 18 May 2017. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.7953513>
- [14] Babiarz J., Chan K., Baker F., *Configuration Guidelines for DiffServ Service Classes*, RFC 4594, IETF Network working group, August 2006.
[doi:10.17487/RFC4594](https://doi.org/10.17487/RFC4594)
- [15] Duke M., Braden R., Eddy W., Blanton E., Zimmermann A., A Roadmap for Transmission Control Protocol (TCP) Specification Documents, RFC 4614, IETF Network working group, February 2015.
[doi:10.17487/RFC4614](https://doi.org/10.17487/RFC4614)
- [16] Mills D., Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI, RFC 4330, IETF Network working group, January 2006.
[doi:10.17487/RFC4330](https://doi.org/10.17487/RFC4330)
- [17] Postel J., Internet Control Message Protocol, RFC 792, IETF Network working group, September 1981.
[doi:10.17487/RFC0792](https://doi.org/10.17487/RFC0792)
- [18] Case J., Fedor M., Schoffstall M., Davin J., A Simple Network Management Protocol (SNMP), RFC 1157, IETF Network Working Group, May 1990.
[doi:10.17487/RFC1157](https://doi.org/10.17487/RFC1157)
- [19] Presuhn R., McCloghrie K., Rose M., Waldbusser S., Management Information Base (MIB) for the Simple Network Management Protocol (SNMP), RFC 3418, IETF Network Working Group, December 2002.
[doi:10.17487/RFC3418](https://doi.org/10.17487/RFC3418)
- [20] Rentschler M., Heine H., The Parallel Redundancy Protocol for Industrial IP Networks, in Proc. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Cape Town, South Africa, 25-28 February 2013.
<https://doi.org/10.1109/ICIT.2013.6505877>

AUTORI/AUTHORS

Ivan Vujović, MSCEE, Ericsson AB Štokholm, dio stranog društva Podgorica, ivanvu@t-com.me, ORCID [0000-0002-4108-6985](https://orcid.org/0000-0002-4108-6985)
Zoran Stojanović, prof. Dr, Elektrotehnički Fakultet Univerziteta u Beogradu, stojanovic@etf.rs, ORCID [0000-0003-2432-394X](https://orcid.org/0000-0003-2432-394X)
dr Željko Đurišić - vanredni profesor, Elektrotehnički Fakultet Univerziteta u Beogradu, djurisic@etf.rs, ORCID [0000-0003-2048-0606](https://orcid.org/0000-0003-2048-0606)

Modeli korišćenja električne energije kupaca-proizvođača

Models of Prosumers Electricity Usage

Dunja Grujić*, Miloš Kuzman**

* Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Bulevar umetnosti 12, Novi Beograd

** Udruženje za pravo energetike Srbije, Pjarona De Mondezira 30, Beograd

Rezime - U svetlu naglog i značajnog povećanja cene električne energije na globalnom tržištu u 2021. godini koncept proizvodnje električne energije za sopstvene potrebe dobija na značaju. Ovaj rad će analizirati mogućnosti smanjenja troškova za električnu energiju krajnjih kupaca koji postanu kupci-proizvođači. Takođe, obradiće i načine sopstvenog upravljanja potrošnjom kupaca-proizvođača u cilju racionalnijeg korišćenja proizvedene električne energije i poboljšanja energetske efikasnosti.

Pored navedenog, biće razmatran uticaj kupaca-proizvođača na ukupnu proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora u Republici Srbiji. U tom smislu posebna pažnja će se obratiti na različite modele procene ukupno proizvedene električne energije u objektima kupaca-proizvođača, u skladu sa Zakonom o korišćenju obnovljivih izvora energije.

Na kraju rada biće predstavljeni rezultati sprovedenih analiza, kao i mogućnosti za budući razvoj koncepta kupca-proizvođača u cilju bržeg i uspešnijeg ostvarenja ciljeva u skladu sa preuzetim obavezama koje proističu iz međunarodnih ugovora, a koji će biti implementirani u Integrisani nacionalni energetska i klimatski plan. Takođe, prilikom vršenja istraživanja posebna pažnja biće posvećena međunarodnoj praksi u predmetnoj oblasti.

Ključne reči - kupac-proizvođač, obnovljivi izvori električne energije, energetska efikasnost, Integrisani nacionalni energetska i klimatski plan

Abstract - In light of the sharp and significant increase of the electricity price on the global market in 2021, the concept of electricity production for the own needs gained importance. This work will analyze the possibilities of reducing electricity costs for end customers who become prosumers. It will also present ways of managing prosumers consumption in order to more rationally use produced electricity and improve energy efficiency.

In addition, the impact of prosumers on total electricity generation from renewable sources in the Republic of Serbia will be discussed. To that end, special attention shall be on different models of assessment of total electricity produced in prosumers facilities, in accordance with the Law on the Use of Renewable Energy Sources.

At the end, the results of the analyses will be presented, as well as possibilities for future development of the prosumers concept, in order to achieve the goals in faster and more

successful manner, in accordance with the commitments made in international agreements, which will be implemented in the Integrated National Energy and Climate Plan. In addition, when conducting research, special focus shall be on international practice in this area.

Index Terms - Prosumer, Renewable electricity sources, Energy efficiency, Integrated national energy and climate plan

I UVOD

Zaključci sa poslednje globalne konferencije Ujedinjenih Nacija o klimatskim promenama koja je održana u Glazgovu teško da bi se mogli nazvati ohrabrujućim za čovečanstvo. Celom svetu su poslali apeli da se pooštri borba protiv klimatskih promena usled sve razornijih posledica, na šta značajan uticaj ima i ubrzanje energetske tranzicije. Nekako je paralelno došlo do globalnog problema rasta cena električne energije usled nekoliko razloga koji su istovremeno pogodili energetska sektor¹, a koji su se posebno odrazili na Evropsku Uniju, kao i na ugovorne strane Energetske zajednice. Rešenje za navedene probleme bi se, između ostalog, moglo tražiti u promociji i podsticanju mehanizama koji bi mogli doprineti da se ovakva neoptimistična slika promeni. Jedan od takvih mehanizama bi mogao biti i institut kupca-proizvođača.

Ovaj institut bi se najosnovnije mogao definisati kao lokalna proizvodnja energije za sopstvenu potrošnju i predavanje viškova proizvedene električne energije u elektroenergetski sistem (u daljem tekstu EES). Iz navedene definicije vidimo da već u svom osnovnom obliku institut kupca-proizvođača može uticati pozitivno na ubrzanje energetske tranzicije na taj način što se troši lokalno proizvedena električna energija čime se smanjuju gubici u distributivnom EES (u daljem tekstu: DEES) i prenosnom EES, jer ne dolazi do njenog prenosa do udaljenih korisnika sistema i istovremeno se ne opterećuje EES. Takođe, stvara se i mogućnost da više izvora električne energije može da se priključi na mrežu bez dodatnih investicija.

¹ Neki od njih su: oporavak ekonomija od korona virusa i ekstenzivno korišćenje uređaja za hlađenje tokom leta, porast potražnje za energijom uz istovremenu smanjenu ponudu prirodnog gasa na svetskom tržištu, zima je bila hladnija nego očekivano što je dovelo do veće potražnje za toplotnom energijom i istovremeno do smanjenja količina prirodnog gasa u skladištima, itd.

Kada se ovaj institut regulatorno unapredi, na način na koji to predviđa takozvani Četvrti energetska paket propisa Evropske Unije – Čista energija za sve Evropljane, a posebno Direktiva o energiji iz obnovljivih izvora [1] koju preuzima Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije (u daljem tekstu: Zakon) [2], kao i Zakon o energetici u svojim poslednjim izmenama i dopunama [3] i Zakon o energetske efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije [4], tako što se propisuje da kupac-proizvođač može biti samo onaj entitet koji proizvodi električnu energiju iz obnovljivih izvora energije², onda su pozitivni efekti ovog instituta na energetske tranzicije vidljiviji i značajniji. Takođe, instaliranjem svojih proizvodnih kapaciteta kupac-proizvođač preuzima aktivnu ulogu na tržištu električne energije i time smanjuje svoju zavisnost od fluktuirajućih tržišnih uslova.

Usled sve većih interesa na tržištu za uslove pod kojima se postaje kupac-proizvođač, u ovom radu će biti predstavljene prednosti kupca-proizvođača kako za smanjenje sopstvenih troškova električne energije tako i njihov pozitivan uticaj na EES i povećanje instaliranih proizvodnih kapaciteta iz obnovljivih izvora električne energije. Analiziraće se i efekat nekoliko modela procene ukupno proizvedene električne energije od strane kupca-proizvođača i efekti tih modela na dostizanje ciljeva energetske tranzicije. Određena međunarodna rešenja u ovoj oblasti takođe će biti razmatrana.

II NAČIN OBRACHUNA ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA KUPCE-PROIZVOĐAČE

Kada govorimo o načinu obračuna električne energije kupcima-proizvođačima od strane snabdevača, neophodno je istaći prednosti u odnosu na obračun od strane snabdevača za krajnje kupce. Bitno je napomenuti da je propisivanje posebnog načina obračuna za kupce-proizvođače doneto u cilju podstrek izgradnje proizvodnih kapaciteta iz obnovljivih izvora električne energije. Kako bi se kupcima-proizvođačima omogućile pogodnosti za priključenje na EES, kao i za obračun električne energije, avgusta 2021. godine Vlada Republike Srbije donela je Uredbu o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača [5] koja se detaljno bavi predmetnim pitanjima.

Svaki korisnik EES, pa tako i kupac-proizvođač, dužan je da uredi snabdevanje električnom energijom, pristup sistemu i balansnu odgovornost. [3, 5] Kupci-proizvođači koji su domaćinstva ili stambene zajednice imaju pravo na zaključenje ugovora o potpunom snabdevanju sa neto merenjem, dok svi ostali kupci-proizvođači imaju mogućnost zaključenja ugovora o potpunom snabdevanju sa neto obračunom. [5] Ugovorom o potpunom snabdevanju snabdevač se obavezuje da za mesto primopredaje električne

energije kupca-proizvođača pre početka snabdevanja uredi pristup EES sa nadležnim operatorom sistema, kao i balansnu odgovornost. [3]

Kupac-proizvođač svoje ukupne potrebe za električnom energijom (W_{kp}) obezbeđuje delom iz proizvodnje sopstvenog proizvodnog objekta (W_{pop}), a delom iz EES (W_{ees}) kupovinom električne energije od izabranog snabdevača u periodima kada proizvodnja proizvodnog objekta ne može da zadovolji njegove potrebe.

$$W_{kp} = W_{pop} + W_{ees} \quad (1)$$

Ukupno proizvedena električna energija proizvodnog objekta kupca-proizvođača (W_{po}) delom se iskoristi za sopstvenu potrošnju kupca-proizvođača (W_{pop}), a delom se isporuči u EES (W_{poees}) snabdevaču u periodima kada proizvodni objekat proizvodi više električne energije od potreba kupca-proizvođača.

$$W_{po} = W_{pop} + W_{poees} \quad (2)$$

Za razliku od neto obračuna gde kupac-proizvođač sa snabdevačem slobodno ugovara uslove obračuna uzajamnih potraživanja i obaveza, neto merenje je striktno definisano u [5], što će u nastavku biti detaljnije opisano.

U slučaju kada govorimo o ugovoru o potpunom snabdevanju sa neto merenjem, snabdevač je dužan da za svaki obračunski period³, kupcu – proizvođaču, pored obračuna poreza, akciza, naknada i drugih pripadajućih obaveza, obračuna:

- ukupnu neto električnu energiju (W_{net}) kao razliku ukupno preuzete (W_{ees}) i ukupno isporučene električne energije (W_{poees}) i viškova iz prethodnih perioda (W_{vp}), i

$$W_{net} = W_{ees} - W_{poees} - W_{vp} \quad (3)$$

- višak (W_v) koji se prenosi u naredni obračunski period.

Ukoliko je neto električna energija (W_{net}) u posmatranom obračunskom periodu manja od nule (tj. ukoliko je kupac-proizvođač u posmatranom obračunskom periodu više električne energije isporučio u EES, zajedno sa viškovima iz prethodnih perioda, nego što je iz preuzeo iz EES) snabdevač kupcu-proizvođaču obračunava neto električnu energiju od nula kWh, dok razliku isporučene električne energije u EES (W_{poees}) uvećane za viškove iz prethodnih perioda W_{vp} , i preuzete električne energije iz EES (W_{ees}) obračunava kao višak (W_v) koji se prenosi u naredni obračunski period. Viškovi električne energije se prenose iz jednog u drugi obračunski period u okviru perioda za poravnanje potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača koji traje od 1. aprila tekuće godine zaključno sa 31. martom naredne godine. Ukoliko nakon martovskog obračuna postoji višak koji bi trebalo da bude prenet u naredni obračunski period, kupac-proizvođač ga predaje snabdevaču bez naknade i nakon toga počinje novi period za poravnanje potraživanja pri čemu je višak električne energije jednak nuli. Ukoliko je neto električna energija

² U skladu sa članom 4 stav 1 tačka 23) Zakona, kupac-proizvođač je krajnji kupac koji je na unutrašnje instalacije priključio sopstveni objekat za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije, pri čemu se proizvedena električna energija koristi za snabdevanje sopstvene potrošnje, a višak proizvedene električne energije isporučuje u prenosni sistem, distributivni sistem, odnosno zatvoreni distributivni sistem [2]

³ Obračunski period je po pravilu kalendarski mesec [5]. Snabdevač kupcu-proizvođaču izdaje račun za svaki obračunski period pojedinačno.

(W_{net}) u posmatranom obračunskom periodu veća od nule, snabdevač kupcu-proizvođaču obračunava neto električnu energiju, a višak koji se prenosi u naredni obračunski period (W_p) je nula kWh. [5] Svi opisani proračuni u skladu sa [5] vrše se po vremenima primene tarifa za električnu energiju.

III UPOREDNI PRISTUPI OBRAČUNA ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA KUPCE-PROIZVOĐAČE

Način obračuna električne energije za kupce-proizvođače razlikuje se od države do države u regionu. Tako je u Bosni i Hercegovini prihvaćen pristup obračuna električne energije putem neto merenja, dok se neto obračun koristi u Crnoj Gori i Republici Severnoj Makedoniji. Neke druge zemlje slede primer Republike Srbije i usvajaju oba principa, ali ne na isti način, kao što je Gruzija. Poseban slučaj predstavlja Ukrajina gde za sve kupce-proizvođače koji isporučuju električnu energiju iz obnovljivih izvora energije postoje podsticaji u vidu feed-in tarifa. [6]

Poseban slučaj predstavlja Republika Hrvatska u kojoj ne postoji institut kupca-proizvođača na način na koji je to uređeno u Republici Srbiji već su prepoznati instituti korisnika postrojenja za samoopskrbu⁴ i krajnjeg kupca za vlastitu proizvodnju.⁵ [7]

U Republici Hrvatskoj je za oba ova instituta prihvaćen princip obračuna električne energije putem neto obračuna, ali na način da je određena minimalna cena po kojoj snabdevač otkupljuje električnu energiju od korisnika postrojenja za samoopskrbu i krajnjeg kupca za vlastitu proizvodnju, za razliku od načina obračuna u Republici Srbiji opisanog u poglavlju II ovog rada.

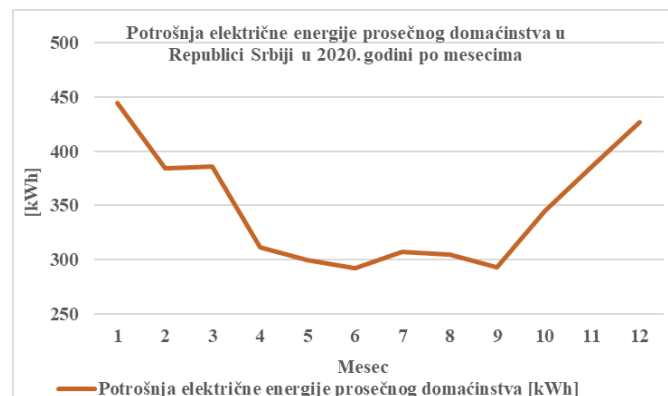
Način obračuna električne energije je svakako jedan od parametara koji krajnji kupci uzimaju u obzir kada se odlučuju da postanu kupci-proizvođači. Nezavisno od toga kakav je način obračuna električne energije prihvaćen u državama koje smo naveli, izvesno je da su sve one razvile različite mehanizme koji omogućavaju kupcima-proizvođačima, ili institutima koji su srodni ovom institutu, da im na jasno regulisan način bude obračunata predata električna energija u DEES kao i preuzeta električna energija iz DEES. Takav pristup omogućava transparentnost samog procesa i u konačnici dovodi do pozitivnog uticaja na razvoj regionalne

mreže kupaca-proizvođača a time i do bržeg dostizanja ciljeva energetske tranzicije.

IV DOMAĆINSTVA KAO KUPCI PROIZVOĐAČI

S obzirom na to da je način obračuna za kupce-proizvođače koji su domaćinstva u Republici Srbiji definisan u [5], i da su cene garantovanog snabdevača [8], koji snabdeva gotovo sva domaćinstva u Republici Srbiji [9], regulisane [3], u produžetku će biti dat proračun optimalne instalisane snage fotonaponske elektrane⁶, obračun električne energije i viškova od strane snabdevača, kao i predlozi mogućnosti efikasnijeg korišćenja proizvedene električne energije za kupca-proizvođača koji je prosečno domaćinstvo u 2020. godini u Republici Srbiji.

U 2020. godini na DEES bilo je priključeno ukupno 3.281.525 domaćinstava, čija je potrošnja u toku 2020. godine iznosila 13.718.126 MWh. [9] Dakle, prosečna potrošnja domaćinstva u Republici Srbiji u 2020. godini je 4.180 kWh godišnje, odnosno 348 kWh mesečno. S obzirom na to da domaćinstva ne troše linearno električnu energiju po mesecima, za potrebe predmetne analize pretpostavljeno je da raspodela potrošnje domaćinstava⁷ po mesecima 2020. godine prati mesečnu raspodelu ukupne električne energije u DEES, koja je preuzeta iz [10]. Ukupna potrošnja električne energije prosečnog domaćinstava po mesecima, dobijena na opisan način, prikazana je na slici 1.



Slika 1. Potrošnja električne energije prosečnog domaćinstva u Republici Srbiji po mesecima

Na osnovu prethodno izračunate potrošnje električne energije prosečnog domaćinstva u Republici Srbiji i profila potrošnje domaćinstava definisanih u [11] proračunati su satni utrošci prosečnog domaćinstva (u daljem tekstu: satni utrošci).

Za određivanje optimalne instalisane snage fotonaponske elektrane neophodno je poznavati resurse solarne energije na ciljnoj mikrolokaciji, geografsku širinu, karakteristike elemenata sistema i ambijentalne uslove. [12] Za potrebe proračuna optimalne instalisane snage fotonaponske elektrane, kao i njene proizvodnje, korišćen je programski paket PVGIS i njegove integrisane on-line baze podataka. [13]

⁶ Pretpostavka je da će se većina kupaca-proizvođača opredeliti za izgradnju fotonaponske elektrane za svoj proizvodni objekat.

⁷ Prilikom proračuna analizirano je domaćinstvo sa jednotarifnim obračunom.

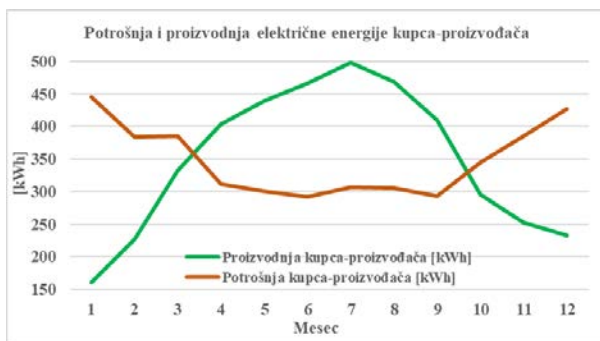
⁴ korisnik postrojenja za samoopskrbu je onaj krajnji kupac električne energije kategorije kućanstvo uključujući ustanove, koji unutar svojih instalacija ima priključeno postrojenje za samoopskrbu električnom energijom iz obnovljivih izvora energije ili visokoučinkovite kogeneracije, čije viškove energije unutar obračunskog razdoblja može preuzeti opskrbljivač ili tržišni sudionik s kojim postoji sklopljen odgovarajući ugovor, pod uvjetom da je unutar kalendarske godine količina električne energije koju je predao u mrežu manja ili jednaka preuzetoj električnoj energiji.

⁵ krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom je krajnji kupac električne energije na čiju je instalaciju priključeno proizvodno postrojenje za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije ili visokoučinkovite kogeneracije kojom se podmiruju potrebe krajnjeg kupca i s mogućnošću isporuke viška proizvedene električne energije u prijenosnu ili distribucijsku mrežu.

S obzirom na to da je period za poravnanje potraživanja i obaveza između kupca–proizvođača i snabdevača period od 01. aprila tekuće godine do 31. marta naredne godine [5] optimalna proizvodnja proizvodnog objekta kupca-proizvođača na godišnjem nivou treba da bude približno jednaka njegovoj godišnjoj potrošnji, kako bi se izbegla predaja viška električne energije snabdevaču bez prava na naknadu.

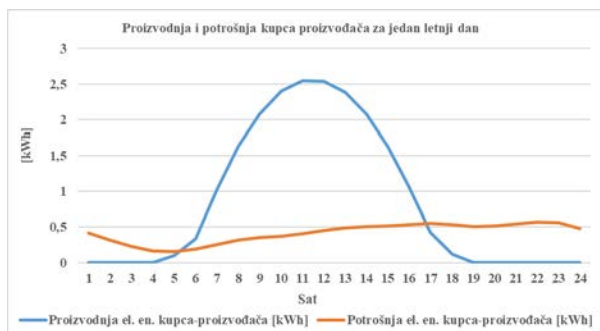
Za razmatrano prosečno domaćinstvo, sa godišnjom potrošnjom od 4.180 kWh, na teritoriji Beograda, optimalna instalisana snaga fotonaponske elektrane postavljene na objektu, sa optimalnim nagibnim uglom, iznosi 3,5 kW. Proračun je izvršen u aplikaciji PVGIS, iz koje su preuzeti i podaci o proizvodnji elektrane na satnom (u daljem tekstu: satna proizvodnja) i godišnjem (ukupno 4.186 kWh) nivou.

Ukupna proizvodnja i potrošnja električne energije posmatranog kupca-proizvođača, na mesečnom nivou, prikazana je na slici 2.

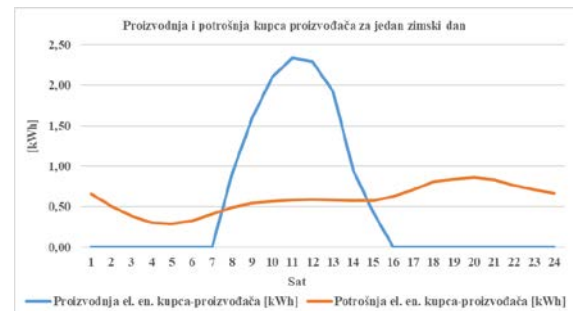


Slika 2. Potrošnja i proizvodnja električne energije kupca-proizvođača koji je prosečno domaćinstvo na mesečnom nivou

Na osnovu rezultata proračuna prikazanih na slici 2 zaključuje se da je u periodu od aprila do septembra proizvodnja fotonaponske elektrane veća od potrošnje prosečnog domaćinstva, dok je u periodu od oktobra do marta situacija obrnuta što je posledica potreba domaćinstava za električnom energijom i mogućnosti fotonaponske elektrane za proizvodnju električne energije. U prilog iznetom na slikama 3 i 4 prikazani su satni utrošci posmatranog kupca-proizvođača, kao i satna proizvodnja njegove fotonaponske elektrane u jednom letnjem, odnosno zimskom danu, respektivno. Može se primetiti da je u letnjem danu proizvodnja značajno veća od potrošnje, dok je u zimskom danu obrnuto.



Slika 3. Potrošnja kupca-proizvođača i proizvodnja njegove sopstvene fotonaponske elektrane u jednom letnjem danu



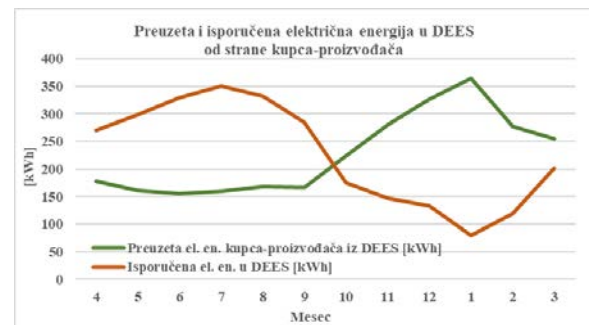
Slika 4. Potrošnja kupca-proizvođača i proizvodnja njegove sopstvene fotonaponske elektrane u jednom zimskom danu

Poređenjem podataka o satnim utrošcima i satnim proizvodnjama, u svakom satu 2020. godine pojedinačno, za analiziranog kupca-proizvođača utvrđena je:

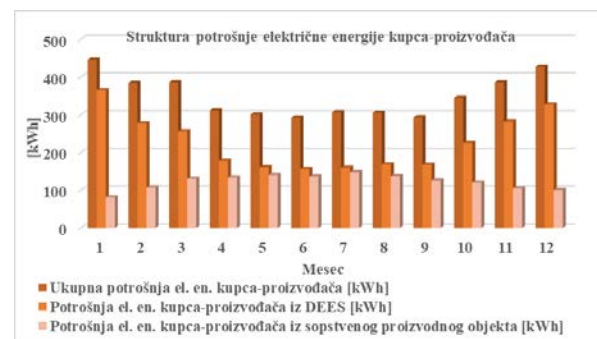
- količina električne energije koju je preuzeo iz DEES, odnosno isporučio u DEES,
- struktura njegove potrošnje tj. količina električne energije koju je potrošio iz sopstvene fotonaponske elektrane, odnosno iz DEES,
- struktura njegove proizvodnje tj. količina električne energije koju je potrošio iz sopstvene fotonaponske elektrane, odnosno isporučio u DEES,

koje su sumirane na mesečnom nivou i prikazane na slikama 5, 6 i 7, respektivno.

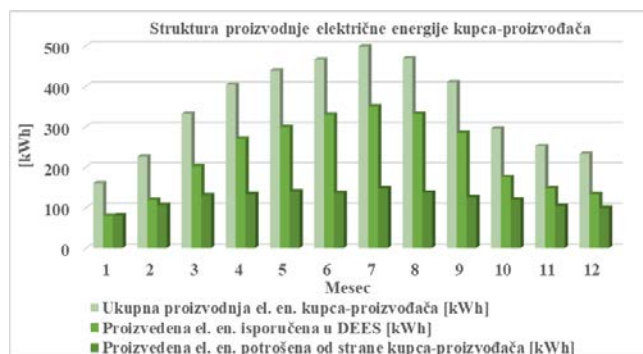
Na slici 8 prikazana je količina obračunate električne energije, neto električne energije [5] i viškova po mesecima posmatrane godine kupcu-proizvođaču od strane snabdevača.



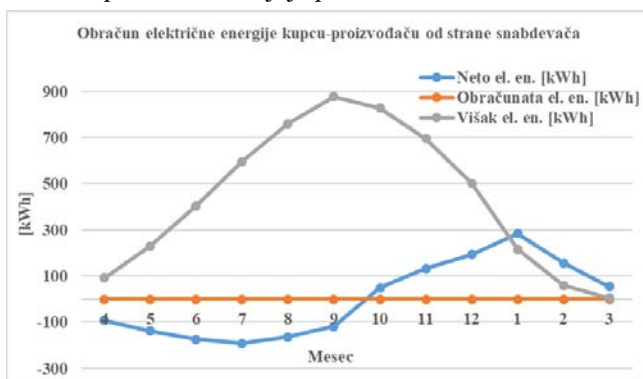
Slika 5. Preuzeta i isporučena električna energija u DEES od strane kupca-proizvođača



Slika 6. Struktura potrošnje električne energije kupca-proizvođača koji je prosečno domaćinstvo



Slika 7. Struktura proizvodnje električne energije kupca-proizvođača koji je prosečno domaćinstvo



Slika 8. Obračun električne energije, neto električna energija i višak električne energije

Sa slika 3 - 8 može se uočiti opravdanost predloženog modela perioda poravnanja. Potrošnja u aprilu za prosečno domaćinstvo manja je od proizvodnje fotonaponske elektrane optimalne instalisane snage, te se višak električne energije akumulira već od aprila, prvog meseca perioda poravnanja, sve do septembra, a zatim se polako troši od septembra do marta naredne godine⁸. Dakle, snabdevač posmatranom kupcu-proizvođaču u analiziranoj godini neće obračunati troškove za električnu energiju. Takođe, zaključuje se da je višak električne energije koji se isporučuje snabdevaču bez naknade zanemarljiv (u konkretnom slučaju samo 6 kWh), čime se potvrđuje da je izračunata instalisana snaga elektrane optimalna.

V MOGUĆNOSTI DODATNIH UŠTEDA KUPACA-PROIZVOĐAČA

Analizom rezultata proračuna prikazanih na slici 6 može se zaključiti da posmatrani kupac-proizvođač u letnjim mesecima značajan deo svoje potrošnje pokriva iz svoje fotonaponske elektrane, dok u prelaznim i zimskim mesecima dominantno svoju potrošnju pokriva preuzimanjem električne energije iz DEES. Nasuprot tome, na slici 7 može se videti da od ukupne proizvodnje fotonaponske elektrane kupac-proizvođač za sopstvene potrebe potroši manje od 35%, dok se ostatak proizvedene električne energije isporučuje u DEES usled činjenice da fotonaponske elektrane ne proizvode električnu energiju podjednako u toku cele godine, kao ni na nivou dana. Pored toga, fotonaponske elektrane su uglavnom projektovane

tako da proizvodnja na godišnjem nivou bude jednaka potrošnji kupca-proizvođača na godišnjem nivou, što dovodi do pojave da one u periodu maksimalne proizvodnje proizvode značajno veću količinu električne energije od one koja je potrebna kupcu-proizvođaču u datom trenutku, pri čemu se sav višak isporučuje u DEES.

Nizak procenat upotrebe električne energije proizvedene u fotonaponskoj elektrani za sopstvenu potrošnju kupca-proizvođača i visok procenat isporučene električne energije u DEES ima negativne uticaje na:

- kupca-proizvođača u smislu smanjenja njegovih ušteda i povećanja njegovih troškova (naročito ukoliko sa snabdevačem ima zaključen ugovor o potpunom snabdevanju sa neto obračunom),
- DEES (veće opterećenje DEES, problemi sa evakuacijom energije, promena tokova snaga, potencijalni problemi previsokih napona, smanjenje mogućnosti integracije novih proizvodnih kapaciteta iz obnovljivih izvora itd).

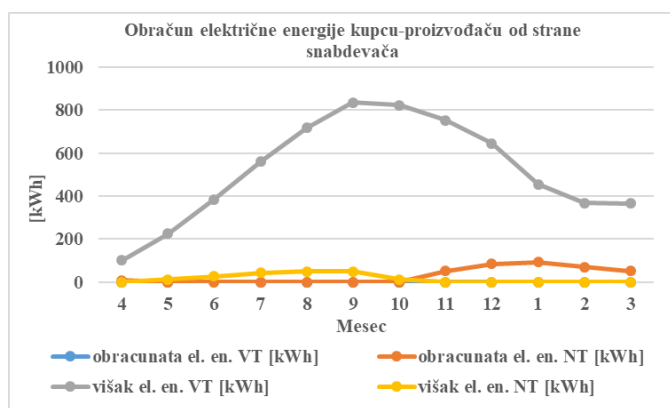
Opisani negativni uticaji se mogu umanjiti:

- upravljanjem potrošnjom u smislu da se teži potrošnji električne energije u periodima kada fotonaponska elektrana proizvodi električnu energiju, čime se povećava procenat upotrebe električne energije proizvedene u sopstvenom proizvodnom objektu, smanjuje isporuka električne energije u DEES, kao i preuzimanje iz DEES,
- upotrebom skladišta električne energije [5] u kojima bi se deponovala električna energija u periodima kada je proizvodnja elektrane veća od potreba kupca-proizvođača (umesto da se isporučuje u DEES) i koristila iz skladišta u periodima kada proizvodnja fotonaponske elektrane ne može da zadovolji potrebe kupca-proizvođača za električnom energijom (umesto da se preuzima iz DEES).

Pozitivni efekti navedenih načina za povećanje procenta iskorišćenosti proizvedene električne energije za sopstvene potrebe kupca-proizvođača mogu se nedvosmisleno videti već na primeru dvotarifnog domaćinstva, s obzirom na to da je u [5] definisano da se obračun viškova vrši po vremenima primene tarifa za električnu energiju. Ukoliko bi domaćinstvo, sa fotonaponskom elektranom instalisane snage 3,5 kW, razmatrano u poglavlju IV, bilo dvotarifno, snabdevač bi kupcu-proizvođaču u toku perioda poravnanja obračunao određenu količinu električne energije u nižoj tarifi (u konkretnom slučaju zbirno 359 kWh), dok bi kupac-proizvođač na kraju perioda poravnanja snabdevaču bez naknade predao određenu količinu električne energije u višoj tarifi (u konkretnom slučaju zbirno 365 kWh) što je prikazano na slici 9.

Rezultati prikazani na slici 9 su posledica toga što fotonaponska elektrana električnu energiju dominantno proizvodi tokom više tarife, te se u njoj akumuliraju i značajni viškovi, dok je za vreme trajanja niže tarife njena proizvodnja gotovo zanemarljiva, te ne može na nivou perioda poravnanja da zadovolji potrebe kupca-proizvođača u nižoj tarifi.

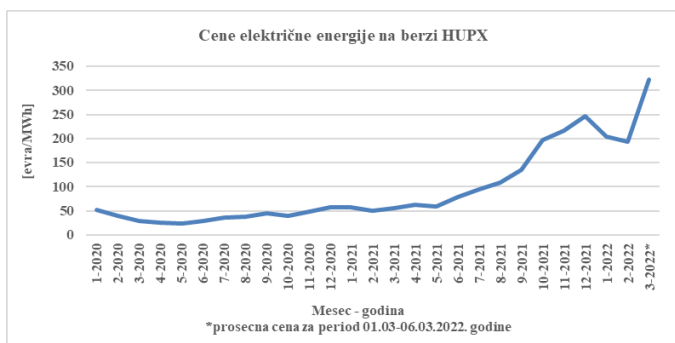
⁸ Za potrebe proračuna pretpostavljeno je da su prva tri meseca 2021. godine identična sa prva tri meseca 2020. godine



Slika 9. Obračun električne energije, neto električna energija [5] i višak električne energije za prosečno dvotarifno domaćinstvo

Na konkretnom primeru datom na slici 9 može se zaključiti da upravljanje potrošnjom, kao i ugradnja skladišta, može značajno doprineti povećanju ušteda za kupca-proizvođača, tako što će se proizvedena električna energija u većoj meri trošiti za sopstvenu potrošnju, a u manjoj isporučivati u DEES. Na ovaj način bi se obračunata električna energija smanjila na najmanju moguću meru, kao i električna energija predata snabdevaču bez naknade (povećanjem potrošnje i skladištenjem u periodima kada elektrana proizvodi više električne energije nego što je neophodno u datom trenutku i smanjenjem potrošnje, odnosno korišćenjem uskladištene električne energije u periodima kada ne proizvodi dovoljno). Na slici 4 prikazan je jedan zimski dan, gde se opisani fenomen može videti i tokom zime, kada je potrošnja značajno veća a proizvodnja drastično manja u odnosu na npr. letnje mesece (videti sliku 3) u kojima su mogućnosti za upravljanje potrošnjom i skladištenje još izraženije (npr. skladištenje tokom dana, potrošnja uskladištene energije noću itd.).

Opisane mere posebno dobijaju na značaju za kupce-proizvođače koji nemaju pravo na garantovano snabdevanje [3] i neto merenje, jer oni sa snabdevačem slobodno ugovaraju način obračuna [5], te cena električne energije isporučene u DEES može biti značajno manja od cene preuzete električne energije iz DEES, što je naročito izazovno u svetlu naglog i višestrukog povećanja cena na tržištu električne energije. Trend rasta cena je prikazan na slici 10 na primeru berze HUPX [14].



Slika 10. Prosečne cene električne energije po mesecima od januara 2020. do marta 2022. godine

Primenom jedne od mera (upravljanje potrošnjom ili skladištenje), ili obe istovremeno, veća količina proizvedene električne energije bi bila potrošena za sopstvenu potrošnju kupca-proizvođača čime bi razmena električne energije kupca-proizvođača sa DEES bila bitno smanjena, čime bi se povećale uštede kupca-proizvođača i skratio period otplate fotonaponske elektrane.

Upravljanje potrošnjom i skladištenje električne energije, pored opisanih prednosti za kupca-proizvođača, bitan pozitivan uticaj imaju i na DEES u smislu smanjenja gubitaka (jer se proizvedena električna energija lokalno troši, neposredno na mestu proizvodnje), lakšeg upravljanja sistemom, manjeg opterećenja DEES čime se omogućava i priključenje većeg broja postrojenja za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije bez dodatnih investicija u DEES što će u svojoj konačnici dovesti do povećanja udela potrošnje električne energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji električne energije u Republici Srbiji. Pored svega navedenog, distribuirano generisanje predstavlja dodatni izvor energije te može potencijalno da zameni deo prenosnog EES, te se takođe i investicije u prenosni EES mogu odložiti, a pri tom dovodi i do smanjenja gubitaka u prenosnom EES. [15]

VI PERIOD OTPLATE PROIZVODNIH OBJEKATA

Svaki kWh električne energije proizveden u proizvodnom objektu kupca-proizvođača i potrošen za njegovu sopstvenu potrošnju menja onaj kWh koji bi kupac-proizvođač kupio od snabdevača, tako da je cena opisanog kWh jednaka ceni po kojoj bi ga kupac-proizvođač kupio od snabdevača.

Ukoliko se pretpostavi da kupac-proizvođač koji je prosečno domaćinstvo ima zaključen ugovor o potpunom snabdevanju sa neto merenjem sa garantovanim snabdevačem tj. da su cene električne energije regulisane i jednake onim datim u cenovniku garantovanog snabdevača [8] period otplate optimalne fotonaponske elektrane je oko deset godina⁹. Međutim, sa povećanjem potrošnje, npr. u slučaju domaćinstava koja se greju na električnu energiju, period otplate se skraćuje i na manje od pet godina. Takođe, za kupce-proizvođače koji nemaju pravo na neto merenje period otplate zavisi od načina obračuna definisanog ugovorom o potpunom snabdevanju sa neto obračunom, ali primenom mera opisanih u poglavlju V period otplate se može bitno skratiti.

Imajući u vidu da je životni vek fotonaponskih elektrana i do 25 godina, sva proizvodnja fotonaponske elektrane nakon perioda otplate je čista ušteda za kupca-proizvođača.

S obzirom na to što kupac-proizvođač po višoj ceni kupuje električnu energiju od snabdevača period otplate proizvodnog objekta je kraći, a uštede nakon perioda otplate veće, te je investicija u proizvodne objekte opravdana naročito u svetlu naglog i značajnog povećanja cena električne energije (slika

⁹ U obzir su uzeti investicioni troškovi izgradnje fotonaponske elektrane i priključenja kupca-proizvođača na DEES. Za cene električne energije korišćene su trenutno važeće cene električne energije za garantovano snabdevanje [8]. Sa povećanjem cene električne energije (videti sliku 10) period otplate elektrane se dodatno skraćuje.

10) i pada troškova opreme za fotonaponske elektrane, pa se može očekivati da će ih u narednom periodu biti sve više.

VII PRORAČUN UKUPNE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE KUPACA-PROIZVOĐAČA

Imajući u vidu da se merno mesto nalazi na mestu razgraničenja DEES i (internih) instalacija objekta [11] kupca-proizvođača, merni uređaj meri električnu energiju koju kupac-proizvođač isporuči u DEES, kao i onu koju preuzme iz DEES. Dakle, ukupna proizvodnja proizvodnog objekta kupca-proizvođača se ne meri prema trenutnoj regulativi Republike Srbije.

S obzirom na to da je operator prenosnog, distributivnog, odnosno zatvorenog distributivnog sistema u obavezi da po isteku tekuće godine izvrši procenu proizvedene električne energije u proizvodnom objektu kupca-proizvođača [2], u nastavku će biti razmotreni različiti modeli zasnovani na:

- proizvodnji prosečnog kW instalisane snage povlašćenih proizvođača u Republici Srbiji na godišnjem nivou¹⁰,
- proizvodnji prosečnog kW instalisane snage svih fotonaponskih elektrana u Republici Srbiji na mesečnom nivou,
- prosečnoj potrošnji odgovarajuće kategorije i grupe korisnika sistema [16] kom pripada posmatrani kupac-proizvođač, i
- proračunu proizvedene električne energije na osnovu egzaktnih parametara - nagibnog i azimutnog ugla, iradijacije na posmatranoj mikrolokaciji itd.

Tokom 2020. godine u Republici Srbiji 0,04% ukupne proizvedene električne energije je proizvedeno iz fotonaponskih elektrana¹¹. [17] U 2020. godini nije postojala nijedna fotonaponska elektrana priključena na prenosni sistem. [18] Do kraja 2020. godine na distributivni sistem priključeno je ukupno 137 fotonaponskih elektrana, ukupne snage 11.528 kW, čija je proizvodnja u toku 2020. godine iznosila 13.262 MWh. [10] 2020. godine ukupna snaga fotonaponskih elektrana u sistemu podsticaja iznosila je 8,82 MW [19], čija je proizvodnja u toku 2020. godine iznosila 9.043,33 MWh [20].

Na osnovu iznetih podataka jedan prosečan kW snage svih fotonaponskih elektrana priključenih na EES Republike Srbije u 2020. godini proizveo je 1,15 MWh na godišnjem nivou, dok je prosečan kW snage fotonaponskih elektrana u sistemu podsticaja u 2020. godini proizveo 1,03 MWh. Razlika iznosi 11,65% jer je u toku 2020. godine u toku vanrednog stanja izazvanog pandemijom korona virusa odloženo dejstvo ugovora o otkupu električne energije za proizvođače u sistemu podsticaja. [21]

¹⁰ Model koji je definisan Pravilnikom o načinu vođenja registra kupaca-proizvođača priključenih na prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem i metodologiji za procenu proizvedene električne energije u proizvodnom objektu kupca-proizvođača.[22]

¹¹ Modeli se mogu primeniti na svaku vrstu proizvodnog objekta pojedinačno, s tim što su za potrebe ovog rada razmatrane samo fotonaponske elektrane.

S obzirom na navedene izazove, i činjenicu da je merodavnije na većem uzorku računati proizvodnju prosečnog kW instalisane snage, jer se na taj način uvažava više različitih elektrana, na različitim lokacijama u Srbiji, prvi model koji u obzir uzima samo povlašćene proizvođače neće dalje biti razmatran. Umesto njega, kao svrsishodniji, biće razmotren drugi model proračuna proizvodnje kupaca-proizvođača na mesečnom nivou (jer fotonaponske elektrane ne proizvode električnu energiju linearno po mesecima u toku godine) zasnovan na mesečnoj proizvodnji prosečnog kW instalisane snage svih fotonaponskih elektrana priključenih na EES Republike Srbije.

Procena proizvodnje proizvodnog objekta kupca-proizvođača i (W_{kpi}^j) u mesecu j bi se vršila na osnovu instalisane snage proizvodnog objekta kupca-proizvođača i (P_{insi}) i proizvodnje jednog prosečnog kW instalisane snage fotonaponskih elektrana u Republici Srbiji u mesecu j (W_{pr}^j) i broja sati u kojima je objekat kupca-proizvođača i bio priključen na DEES (H_{radaji}) u posmatranom mesecu j u kom je ukupan broj sati (H_j), prema sledećoj formuli:

$$W_{kpi}^j = W_{pr}^j \cdot \frac{H_{radaji}}{H_j} \cdot P_{insi} \quad (4)$$

Ukupna proizvodnja svih n kupaca-proizvođača koji su u bilo kom trenutku meseca j bili priključeni na DEES (W_{kp}^j) dobija se kao suma proizvodnje pojedinačnih kupaca-proizvođača (W_{kpi}^j), dok se godišnja proizvodnja (W_{kp}^{god}) izračunava kao zbir mesečnih proizvodnji.

$$W_{kp}^j = \sum_{i=1}^n W_{kpi}^j \quad (5)$$

$$W_{kp}^{god} = \sum_{j=1}^{12} W_{kp}^j \quad (6)$$

Treća mogućnost proračuna ukupne proizvodnje proizvodnog objekta kupca-proizvođača i u mesecu j (W_{kpi}^j) zasniva se na pretpostavci da kupac-proizvođač i ima potrošnju jednaku prosečnoj potrošnji krajnjih kupaca pripadajuće kategorije i grupe korisnika DEES [16] u mesecu j (W_{pr}^j). Ukoliko se pretpostavi da posmatrani kupac-proizvođač ima ukupnu potrošnju jednaku prosečnoj potrošnji svih krajnjih kupaca pripadajuće kategorije i grupe korisnika DEES može se izračunati ukupna proizvodnja elektrane kao zbir (W_{pr}^j) i isporučene električne energije od strane kupca-proizvođača i u DEES u mesecu j (W_{ispi}^j) umanjeno za preuzetu električnu energiju od strane kupca-proizvođača iz DEES u mesecu j (W_{prei}^j). Ukupna proizvodnja svih n kupaca-proizvođača koji su u bilo kom trenutku meseca j bili priključeni na DEES (W_{kp}^j) dobija se kao suma proizvodnje pojedinačnih kupaca-proizvođača (W_{kpi}^j), dok se godišnja proizvodnja (W_{kp}^{god}) izračunava kao zbir mesečnih proizvodnji.

$$W_{kpi}^j = W_{pr}^j + W_{ispi}^j - W_{prei}^j \quad (7)$$

$$W_{kp}^j = \sum_{i=1}^n W_{kpi}^j \quad (8)$$

$$W_{kp}^{god} = \sum_{j=1}^{12} W_{kp}^j \quad (9)$$

Predloženim modelom u konkretnom slučaju rezultat je 4.180 kWh proizvodnje što je više od proizvodnje dobijene po prvom i drugom modelu. Ipak, korišćenje prosečne potrošnje kategorije i grupe korisnika sistema [16] je nepouzdana metoda, sa velikim aproksimacijama, jer su kupci-proizvođači pojedinačni korisnici sistema čija potrošnja može značajno odstupati od proseka pripadajuće kategorije i grupe.

Četvrti model je egzaktni, sa najpouzdanijim rezultatima, ali zahteva veliki broj tačnih podataka (nagibne uglove proizvodnog objekta, precizno merenje iradijacije na konkretnoj lokaciji itd), te je u trenutnom radu operatora sistema veoma zahtevan proces.

S obzirom na sve navedeno može se zaključiti da je drugopredloženi model proračuna ukupne proizvodnje proizvodnog objekta kupaca-proizvođača najrealniji u ovom trenutku, iako daje nešto nižu proizvodnju od trećeg modela, i nešto nepouzdanije rezultate u odnosu na četvrti model. Ipak dati predlog proračuna na osnovu proizvodnje prosečnog kW instalisane snage na mesečnom nivou daje zadovoljavajuće rezultate, jer je već značajan broj fotonaponskih elektrana priključen na DEES u svim delovima Republike Srbije, te se opisanim uprosečavanjem brišu razlike u iradijaciji na različitim mikrolokacijama, različitim nagibnim i azimutnim uglovima elektrana itd. Usled priključenja sve većeg broja proizvodnih objekata rezultati će biti sve pouzdaniji jer će prosek na većem uzorku uzeti više različitosti u obzir.

VIII ZAKLJUČAK

Brojne su prednosti zbog kojih bi krajnji kupac na tržištu električne energije pozeleo da postane kupac-proizvođač. Ovim radom učinjen je pokušaj obrazlaganja određenih prednosti, kao i sam koncept modela kupca-proizvođača. Međutim, pojedina pitanja na koja krajnji kupac čeka odgovore kako bi doneo konačnu odluku da krene putem registracije kupca-proizvođača i dalje ostaju otvorena. Na njih će odgovor dati primena postojećih propisa i njihovo tumačenje u praksi, kao i samo tržište čiji će kupci-proizvođači biti deo.

Ipak, svedoci smo da se u poslednje vreme sve više krajnjih kupaca opredeljuje za ovu odluku. Razlozi za to su svakako na prvom mestu ekonomske prirode, nastali usled naglog skoka cena električne energije, posebno u industrijskom sektoru. I dok čekamo zaokruživanje regulatornog osnova kako bi se u registru kupaca-proizvođača našao naziv prvog registrovanog subjekta, ne sme se zanemariti činjenica da postoje tvrdnje da je i pre donošenja sektorskih propisa faktički postojao jedan broj krajnjih kupaca koji su imali svojstva kupaca-proizvođača na tržištu, upravo podstaknuti prvenstveno ekonomskim interesima.

Analize i zaključci iz ovog rada bi trebalo da kvalitativno doprinesu donosiocima sektorskih odluka, ali i samim krajnjim kupcima, kako bi se unapredilo razumevanje ove problematike u Republici Srbiji. Šire posmatrano, razvojem mreže kupaca-proizvođača Republika Srbija bi se svrstala u red onih država koje na ovaj način vrše značajan doprinos promovisanju

obnovljivih izvora energije i poboljšanja energetske efikasnosti. Efekti takvog činjenja svakako bi se odrazili na ubrzanje energetske tranzicije u Republici Srbiji, što bi posledično dovelo i do ispunjavanja globalnih ciljeva borbe protiv klimatskih promena na koje se Republika Srbija obavezala i ka kojima, nadamo se, nezaustavljivo stremi.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources, Official Journal of the European Union No. L 328/82 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001> [pristupljeno 04.03.2022. godine]
- [2] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije ("Službeni glasnik RS", br. 40/21) https://www.mre.gov.rs/sites/default/files/2021/05/zakon_o_koris_hcenu_obnovljivih_izvora_energije_0.pdf
- [3] Zakon o energetici ("Službeni glasnik RS", br. 145/14, 95/18 - drugi zakon i 40/21) https://www.mre.gov.rs/sites/default/files/2021/03/zakon_o_ener_getici.pdf [pristupljeno 04.03.2022. godine]
- [4] Zakon o energetske efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije ("Službeni glasnik RS", br. 40/21) https://www.mre.gov.rs/sites/default/files/2021/05/zakon_o_ener_getskoj_efikasnosti_i_racionalnoj_upotrebi_energije_0.pdf [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [5] Uredba o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača ("Službeni glasnik RS", br. 83/2021 od 27.8.2021. godine) https://www.mre.gov.rs/sites/default/files/2021/09/uredba_o_kri_terijumima_uslovima_i_nacinu_obračuna_potraživanja_i_obaveza_izme_du_kupca_-_proizvodaca_i_snabdevaca.pdf [pristupljeno 04.03.2022. godine]
- [6] The Energy Community Regulatory Board, Prosumers in the Energy Community Legal and regulatory framework for support and treatment of small-scale generators Special focus on solar photovoltaic (PV) systems connected to the distribution network, March 2020
- [7] Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 138/21 od 15.12.2021. godine) <https://www.zakon.hr/z/827/Zakon-o-obnovljivim-izvorima-energije-i-visokou%C4%8Dinkovitoj-kogeneraciji> [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [8] Odluka o regulisanoj ceni električne energije za garantovano snabdevanje sa primenom od 01. februara 2021. godine, <http://aers.rs/FILES/Odluke/OCenama/2021-02-01%20Cene%20GS%20EPS%20Odluka%20za%20sajt.pdf> [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [9] Izveštaj o radu Agencije za energetiku za 2020. godinu https://www.aers.rs/FILES/Izvestaji/Godisnji/Izvestaj%20Agencije%2020_20.pdf [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [10] Energetski podaci 2020, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd http://epsdistribucija.rs/pdf/GI_2020.pdf [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [11] Pravila o radu distributivnog sistema, jul 2017. godine http://aers.rs/FILES/AktiAERS/AERSDajeSaglasnost/2017-07-19_Pravila%20o%20radu%20ED-ODS%20EPS%20distr.pdf [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [12] Grujić, D., Đurišić, Ž. Uslovi razvoja projekta solarne elektrane u sklopu ts „Beograd 20“, in Proc. CIGRE Srbija, Zlatibor 2015.
- [13] Climate online baze podataka, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [14] HUPX Historical data <https://hupx.hu/en/market-data/dam/historical-data> [pristupljeno 01.03.2022. godine]

- [15] Rajaković, N., Tasić, D. *Distributivne i industrijske mreže*, Akademski misao, Beograd 2008.
- [16] Odluka o utvrđivanju Metodologije za određivanje cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije („Službeni glasnik RS“, broj 105/12) http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/2020_12/SG_158_2020_006.htm [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [17] Godišnji izveštaj o nacionalnom rezidualnom miksu za Srbiju za 2020. godinu, EMS AD
<https://ems.rs/media/uploads/2021/Garancije%20porekla/Godisnji%20izve%C5%A1taj%20o%20nacionalnom%20rezidualnom%20miku%20-%202020.pdf> [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [18] Godišnji tehnički izveštaj EMS AD – 2020, april 2021. godine http://ems.rs/media/uploads/GTI_EMS_AD_2020_Za_objavljivanje.pdf [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [19] Registar povlašćenih proizvođača električne energije, privremenih povlašćenih proizvođača električne energije i proizvođača iz obnovljivih izvora energije 25.01.2021.
http://arhiva.mre.gov.rs/doc/registar-250121.html#Sec_Solar [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [20] Izveštaj o količinama i strukturi električne energije proizvedene u sistemu podsticaja za 2020. godinu <http://www.eps.rs/cir/snabdevanje/Documents/Izve%C5%A1taj%20o%20koli%C4%8Dinama%20i%20strukturi%20elektri%C4%8Dne%20energije%20proizvedene%20u%20sistemu%20podsticaja%20u%202020.godini.pdf> [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [21] Zaključak Vlade RS 05 broj 312-2625/2020 od 18.03.2020. godine <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/vlada/zakljucak/2020/50/2/reg> [pristupljeno 01.03.2022. godine]
- [22] Pravilnik o načinu vođenja registra kupaca-proizvođača priključenih na prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem i metodologiji za procenu proizvedene električne energije u proizvodnom objektu kupca-proizvođača („Službeni glasnik RS“, br. 33/2022 od 11.03.2022. godine) https://srda.rs/wp-content/uploads/eko-pravo/ENERGETIKA/ZAKON_O_KORISCENJU_OBNOVLJIVIH_IZ_VORA_ENERGije/PRAVILNIK_O_NACINU_VODJENJA_REGISTRA_KUPACA_PROIZVODJACA_PRIKLJUCENIH_NA_PRENOSNI_DISTRIBUTIVNI_ODNOSNO_ZATVORENI_DSITRIBUTIVNI_SISTEM.pdf [pristupljeno 01.03.2022. godine]

AUTORI/AUTHORS

Dunja Grujić, Elektrodistribucija Srbije d.o.o., dunja.grujic@ods.rs, ORCID [0000-0001-9298-6249](https://orcid.org/0000-0001-9298-6249)
Miloš Kuzman, Udruženje za pravo energetike Srbije, milos.kuzman@upes.rs, ORCID [0000-0002-9769-9713](https://orcid.org/0000-0002-9769-9713)

Izazovi energetske tranzicije u sektoru individualnog grejanja

Challenges of Energy Transition in the Individual Heating Sector

Boban Pavlović, Dejan Ivezić, Marija Živković

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Rezime - U radu su prikazani rezultati istraživanja i ankete koja je sprovedena 2020. godine u domaćinstvima sa individualnim sistemima grejanja u Srbiji. Cilj ankete je bio da se sagleda stanje individualnih sistema grejanja, ali i stavovi vlasnika sistema vezano za energetske tranziciju. Rezultati ukazuju na zastarelost sistema grejanja, nisku efikasnost, nedovoljna ulaganja u primenu mera energetske efikasnosti i nedostatak finansijskih sredstava za ulaganje u održivo grejanje. Osnovni prioriteti kod izbora načina grejanja jesu troškovi kupovine sistema i troškovi energenta, dok su uticaj ekološkog faktora i svest o potrebi energetske tranzicije relativno slabo izraženi. Troškovi nabavke modernih sistema su identifikovani i kao najveća prepreke za zamenu postojećih sistema, a oko polovine domaćinstava ima pozitivan stav prema potencijalnom subvencionisanju troškova za zamenu postojećih sistema za nove i efikasnije.

Ključne reči - Energetska tranzicija, Individualni sistemi grejanja, Stavovi domaćinstava, Anketa, Srbija

Abstract - This paper presents the results of a household survey about individual heating conducted in Serbia in 2020. The objective of the survey was to examine the details of individual heating systems in households and households' attitudes regarding the energy transition. The results indicate the obsolescence of the heating system, low efficiency, insufficient investment in the implementation of energy efficiency measures, and lack of funds for investment in sustainable heating. The main priorities when choosing a mode of heating are heating system costs and fuel costs, while the impacts of environmental factors and energy transition awareness are relatively weak. The cost of heating systems has also been identified as the biggest barrier to replacing existing systems. On the other hand, about half of households have a positive attitude towards potentially subsidizing the replacement of current heating systems with new and more efficient ones.

Index Terms - Energy transition, Individual heating systems, Household attitudes, Survey, Serbia

I UVOD

Energetska tranzicija danas podrazumeva transformaciju energetske sistema, dominantno oslonjenih na fosilna goriva, u sisteme koji su usmereni na veću primenu

obnovljivih izvora energije (OIE), veću energetske efikasnost i veće energetske uštede [1]. Takođe, današnja energetska tranzicija je usmerena na elektrifikaciju postojećih energetskih sektora [2] u cilju većeg prodora OIE u sektore koji su dominantno vezani za fosilna goriva (saobraćaj) ili neefikasno korišćenje OIE, pre svega drvne biomase (domaćinstva).

Međunarodni politički ambijent u kome se odigrava energetska tranzicija predstavlja značajan pokretač. Međuvladin panel za klimatske promene [3] Pariski klimatski sporazum [4], Evropski zeleni dogovor [5] predstavljaju dokumente koji definišu okvir i predlažu instrumente i finansijske mehanizme usmerene na smanjenje antropogenog uticaja na klimatske promene. Međunarodni konsenzus na ovom polju podstiče tranziciju ka tzv. niskougljeničnim energetskim sistemima [6].

Republika Srbija, kao jedna od država potpisnica Pariskog klimatskog sporazuma i Sofijske deklaracije o Zelenoj agendi za Zapadni Balkan, kao država kandidat za članstvo u EU i kao članica Energetske zajednice, kroz zakone i planske dokumente preuzima određene mere i planira dodatne aktivnosti u cilju stvaranja uslova (institucionalnih, finansijskih i dr.) za veću upotrebu OIE, unapređenje energetske efikasnosti i smanjenje emisije gasova staklene bašte [7], [8].

Sektor domaćinstava, pojedinačno gledano, ima najveće učešće u finalnoj potrošnji energije u Srbiji. Najveći deo potrošene energije u domaćinstvima jeste za grejanje prostora, oko 60% [9]. Oko četvrtina domaćinstava u Srbiji je povezana na sistem daljinskog grejanja, koji se dominantno bazira na proizvodnji toplotne energije iz prirodnog gasa [10]. Veći, preostali deo, domaćinstava se greje preko individualnih sistema grejanja. Međutim, na nacionalnom nivou ne postoji sistemsko prikupljanje podataka i održavanje baza koje bi pružile uvid u strukturu individualnih sistema grejanja, njihovu starost, konfiguraciju, vrste energenata koji se koriste i dr. Republički zavod za statistiku (RZS) publikuje „Anketu potrošnje domaćinstava“ [11], u kojoj jedan segment predstavlja i oblast grejanja domaćinstava. Međutim, podaci su, zbog obima i svrhe ankete, skromni i baziraju se isključivo na definisanju strukture domaćinstava na osnovu energenata koji se koriste za grejanje. Prva detaljnija studija o potrošnji energije u domaćinstvima publikovana je 2021. godine od strane RZS-a [12]. Ova studija je bazirana takođe na anketi domaćinstava, ali daje detaljnije informacije o grejanju

domaćinstava, o vrsti energenata, potrošnji, tipu sistema grejanja (centralno, individualna grejna tela, daljinsko grejanje) i sl. Za analizu individualnog grejanja u Srbiji, navedena studija umnogome olakšava posao, ali kako se odnosi ne samo na individualno, već i na daljinsko grejanje, javlja se problem kod tumačenja podataka koji se odnose na domaćinstva sa individualnim sistemima grejanja, a prikazani su združeno, dakle, i za daljinsko i za individualno grejanje. Pored toga, navedena anketa nije za predmet istraživanja imala stavove domaćinstava u pogledu energetske tranzicije i identifikacije osnovnih prepreka i pokretača za održivije grejanje¹ [13].

Da bi se došlo do detaljnijih informacija o grejanju u domaćinstvima koja imaju individualne sisteme grejanja (centralno i individualna grejna tela), kao što su osnovne karakteristike domaćinstva, karakteristike sistema grejanja, i da bi se ispitala navike, ponašanje i stavovi domaćinstava o tranziciji ka održivijim sistemima grejanja obavljeno je istraživanje [14], koje je između ostalog obuhvatilo i anketiranje 1.100 domaćinstava na teritoriji Republike Srbije.

Predmet istraživanja su bila domaćinstva sa individualnim sistemima grejanja, koja predstavljaju najbrojniju kategoriju domaćinstava i istovremeno kategoriju koju odlikuje velika heterogenost [15]. Prikupljanjem podataka na reprezentativnom uzorku, moguće je identifikovati izazove energetske tranzicije u domaćinstvima, koji mogu predstavljati rizike i pretnje po uspeh tranzicije ka održivijem grejanju, ali mogu imati i pozitivan predznak, u slučaju uspešnog prevladavanja.

II METODOLOGIJA

Jedinica anketiranja u ovoj studiji je domaćinstvo. Pod domaćinstvom se smatra svaka zajednica lica čiji članovi žive zajedno, kao samačka, jednočlana domaćinstva [11]. Na osnovu broja registrovanih domaćinstava kao korisnika daljinskog grejanja u 2020. godini [10] i na osnovu Popisa stanovništva [16], utvrđena je veličina istraživane populacije – 1.851.006 domaćinstava sa individualnim sistemima grejanja. Veličina uzorka [17] potrebna da se zadovolje kriterijumi pouzdanosti od 95% i margine greške od +/- 3% iznosi 1.069 domaćinstava. U tom cilju, u okviru sprovedene ankete, uspešno je anketirano 1.100 domaćinstava.

Tip uzorka je dvoetapni stratifikovani uzorak. Jedinice prvog kruga su regioni: Vojvodina, Beograd, Istočna i Južna Srbija, Šumadija i Zapadna Srbija², tj. opštine i gradovi u regionima. Jedinice drugog kruga su domaćinstva. U prvoj etapi, izbor uzorka je izvršen proporcionalno broju domaćinstava u svakoj od jedinica prvog kruga, a u drugoj etapi, izbor uzorka je baziran na jednakoj verovatnoći (slučajno).

¹ Pod održivijim sistemom grejanja se podrazumeva sistem koji istovremeno, obezbeđuje veću energetska efikasnost, dovodi do smanjenja emisije zagađujućih materija i ugljen-dioksida, a pri tome je dugoročno ekonomski isplativ.

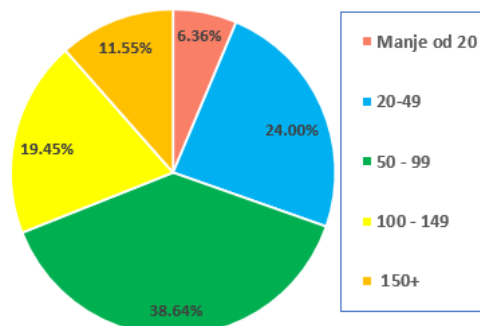
² Imajući u vidu da od 1999. godine zvanična nacionalna statistika ne raspolaže sa podacima za AP Kosovo i Metohija, domaćinstva iz ovog regiona nisu sadržana u obuhvatu uzorka [11].

U anketi je primenjena metoda telefonskog anketiranja domaćinstava. Anketa se sastoji od pitanja zatvorenog i otvorenog tipa. Pitanja se odnose na: osnovne karakteristike domaćinstva (grejna površina, broj članova, izolovanost objekta i sl.), karakteristike sistema grejanja (tip sistema, starost sistema, osnovno gorivo i sl.) i stavove domaćinstva (prihvatanje subvencija, voljnost da se investira, prepreke za kupovinu efikasnijih sistema i sl.). Domaćinstva su anketirana u periodu između oktobra i decembra 2020. godine.

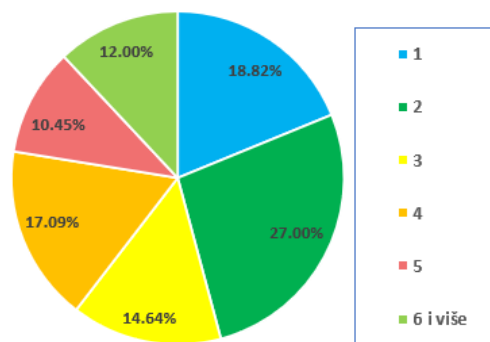
III REZULTATI ANKETE I DISKUSIJA

U nastavku se nalaze procentualno prikazani prikupljeni i obrađeni odgovori domaćinstava koji se odnose na osnovne karakteristike domaćinstva, karakteristike sistema grejanja i stavove domaćinstva.

Slike 1 – 4 prikazuju strukturu domaćinstava u odnosu na grejnu površinu (Slika 1), broj članova domaćinstva (Slika 2), godinu izgradnje stambenog objekta (Slika 3) i sprovedene mere na unapređenju energetske efikasnosti objekta (Slika 4).



Slika 1. Grejna površina [m²]

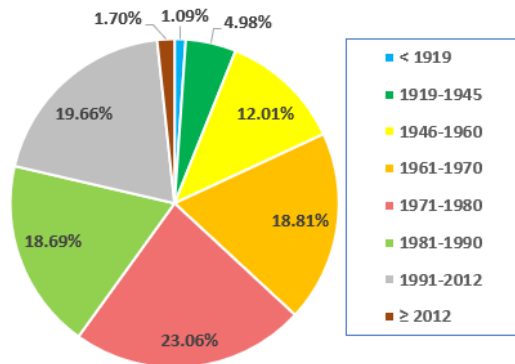


Slika 2. Broj članova domaćinstva

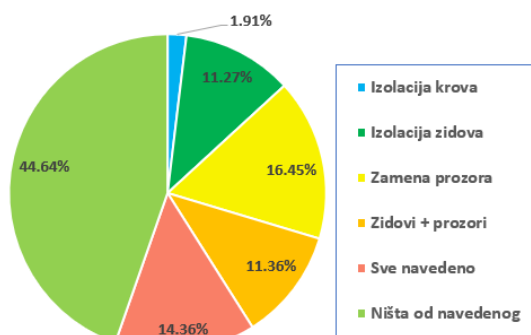
Slika 5 prikazuje strukturu domaćinstava prema dominantnom izvoru energije koji se koristi za grejanje u individualnim sistemima grejanja. U trenutnoj strukturi, dominantni izvor je ogrevno drvo sa 58.09%, nakon koga slede električna energija (15,82%), prirodni gas (12,18%), pelet (6,91%) i ugalj (5,45%). Preostali izvori, kao što su poljoprivredna biomasa, drvni briketi, geotermalna energija itd., zastupljeni su oko 1,55%.

Slika 6 prikazuje starost trenutnih sistema grejanja u domaćinstvima. Kao što se može uočiti, 28% sistema grejanja

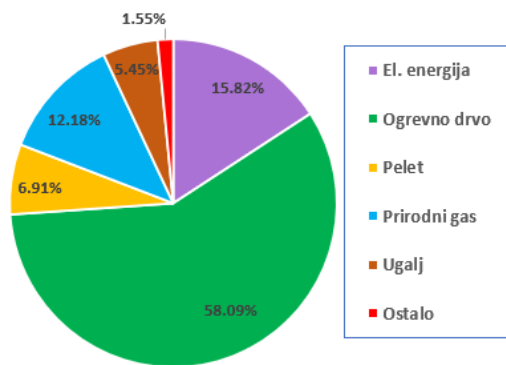
su sistemi koji su relativno novi, odnosno instalirani u poslednje 4 godine. Oko 51% sistema u domaćinstvima je starije od 10 godina.



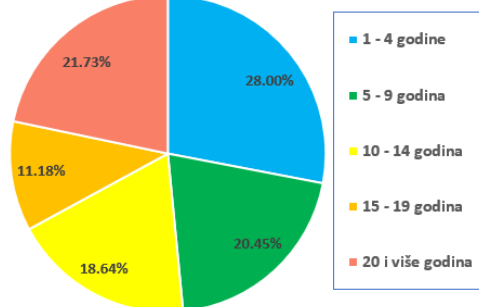
Slika 3. Period izgradnje stambenog objekta



Slika 4. Mere energetske efikasnosti sprovedene u poslednjih 10 godina

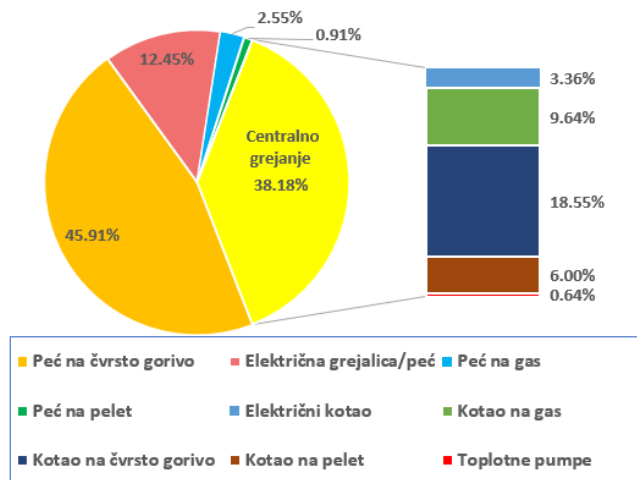


Slika 5. Dominantan energetska izvor za grejanje



Slika 6. Starost trenutnog sistema grejanja u domaćinstvu

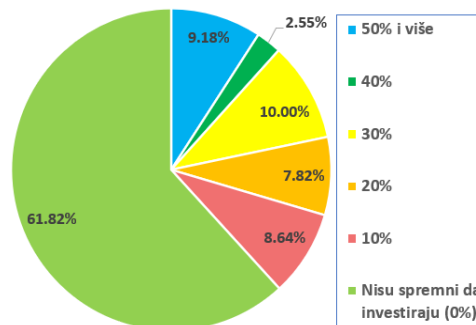
Struktura domaćinstava prema tipu (vrsti) sistema grejanja prikazana je na Slici 7. Na osnovu konfiguracije sistema grejanja, može se uočiti da dominiraju pojedinačni lokalni uređaji (blizu 62%), pre svega bazirani na čvrstim gorivima (peći i šporeti na ogrevno drvo i ugalj), a zatim na električnoj energiji (grejalice, radijatori, termoakumulacione (TA) peći i sl.). Što se tiče centralnih sistema grejanja (centralni izvor toplote + distribucija toplote + grejna tela), najzastupljeniji su kotlovi na čvrsta goriva, koji čine skoro polovinu ovih sistema u strukturi sistema na centralno grejanje. Prikazana struktura ukazuje da skoro 46% sistema grejanja (peći na ogrevno drvo i ugalj) ne poseduje termostats za regulaciju temperature u objektu.



Slika 7. Tip sistema grejanja

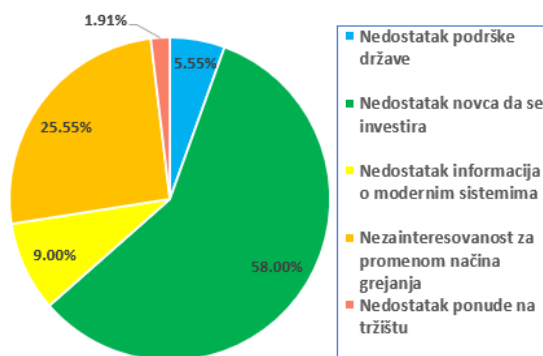
Stavovi domaćinstava u pogledu izazova energetske tranzicije, odnosno glavnih prepreke za tranziciju, kao i mogućih pokretača za održivije grejanje u budućnosti, prikazani su na Slikama 8 – 12.

Slika 8 prikazuje spremnost domaćinstava da investiraju više u sistem grejanje u odnosu na najjeftiniji sistem na tržištu, izraženu procentualno od 0% (nisu spremni da investiraju) do 50% i više. Najveći deo domaćinstava, 61,82%, nije spremno da investira više novca, što ukazuje na nedostatak finansijskih mogućnosti da se menja trenutni sistem za održiviji, odnosno efikasniji i ekološki prihvatljiviji.



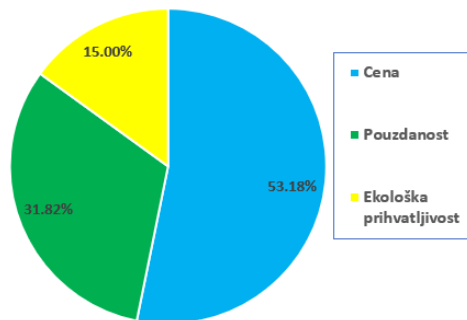
Slika 8. Spremnost da se investira više u održivo grejanje u odnosu na trenutno

Slika 9 prikazuje koje su dominantne prepreke za domaćinstva da zamene trenutne sisteme grejanja. Dominantna prepreka je "nedostatak finansijskih sredstava" koju je kao takvu identifikovalo 58% domaćinstava. Druga prepreka jeste "nezainteresovanost za promenom načina grejanja" i nju je identifikovalo 25,55% domaćinstava. Najčešći razlozi za nezainteresovanost domaćinstava jesu: starost članova domaćinstva, posedovanje vlastite šume ili nedostatak tehničkih i fizičkih uslova za instalaciju nekog drugog sistema grejanja. Preostale prepreke su prepoznate u udelu od oko 16,46%.



Slika 9. Glavne prepreke za zamenu trenutnog sistema grejanja

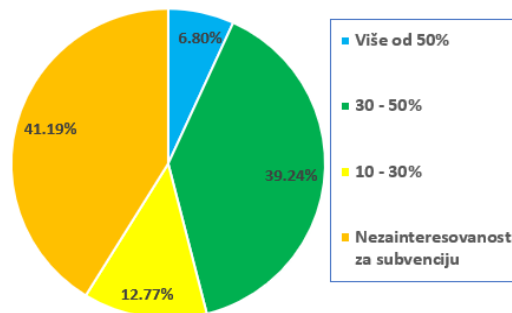
Slika 10 prikazuje značaj pojedinačnih kriterijuma kod izbora sistema grejanja. Najvažniji kriterijum za 53,18% domaćinstava jeste cena sistema. Na drugom mestu je pouzdanost sistema (31,82%), koja je ogleda u verovatnoći da će određeni sistem grejanja izvršavati zahtevanu funkciju u određenom periodu bez zastoja, odnosno u kvalitetu sistema grejanja. Pouzdanost se takođe ogleda i kroz pogodnosti koje određeni sistem ima u pogledu korišćenja i održavanja u odnosu na druge sisteme [18]. Ekološku prihvatljivost, kao glavni kriterijum kod izbora sistema grejanja, označilo je 15% domaćinstava. Ekološka prihvatljivost se odnosi na nivo uticaja koji određeni sistem grejanja ima na zagađenje životne sredine, klimatske promene i neodrživo korišćenje prirodnih resursa [19], u odnosu na druge sisteme.



Slika 10. Glavni kriterijum kod izbora sistema grejanja

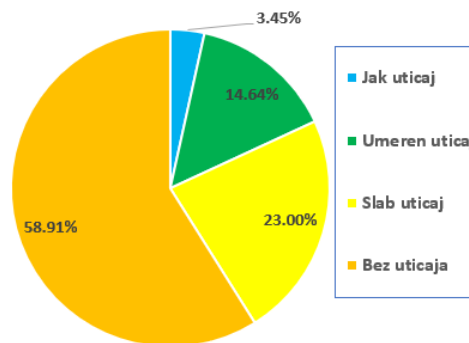
Slika 11 prikazuju strukturu domaćinstava u odnosu na stav prema subvenciji, kao meri ekonomskog podsticaja [20], za zamenu trenutnog sistema grejanja za efikasniji sistem. Udeo domaćinstava koja ne bi prihvatila subvenciju ili subvenciju

smatraju nedovoljnom da bi zamenili trenutni sistem grejanja je 41,19%. Preostali deo domaćinstava (58,81%) prihvatio bi subvencije (od 10% do 50% i više) za zamenu trenutnog sistema.



Slika 11. Subvencija potrebna da se zameni trenutni sistem grejanja

Stav domaćinstava prema zagađenju vazduha u zimskim mesecima je analiziran kroz uticaj vesti o zagađenju na način grejanja domaćinstava. Najveći deo domaćinstava (58,91%) deli stav da ove vesti nemaju uticaja na njihov način grejanja.



Slika 12. Uticaj informacija o zagađenju vazduha tokom grejne sezone na odluku o načinu grejanja

V ZAKLJUČAK

Uspešan odgovor na izazove koje određeni prirodni, tehnički, društveni proces ili pojava donosi zahteva empirijski sakupljene podatke. Na taj način sakupljeni podaci garantuju određeni nivo pouzdanosti, objektivnosti i sistematičnosti. Za potrebe prikupljanja podataka koji se odnose na grejanje domaćinstava sa individualnim sistemima grejanja, koji predstavljaju oko 3/4 domaćinstava u Srbiji, u 2020. godini je sprovedeno anketiranje.

Osnovni zaključci koje mogu izvući iz rezultata ankete jesu:

- većinsko prisustvo individualnih sistema grejanja u domaćinstvima koji su bazirani na ogrevnom drvetu;
- gotovo polovina (45%) sistema grejanja su lokalne peći i šporeti niske energetske efikasnosti;
- u strukturi dominiraju lokalni uređaji za grejanje koji služe za grejanje dela stambenog prostora, što otvara pitanje termalnog komfora u pomenutim domaćinstvima;
- nedostatak finansijskih sredstava za investiranje u

- efikasnije sisteme osnovna prepreka za bržu tranziciju;
- nizak nivo svesti o uticaju individualnih sistema grejanja na lokalno zagađenje;
- oko polovine domaćinstava u poslednjih 10 godina nije unapredilo energetska efikasnost prostora u kome žive;
- većinska zainteresovanost domaćinstava da prihvate subvencije za zamenu postojećih sistema grejanja.

Sprovedena anketa imala je za cilj ne samo opis trenutnog stanja u sektoru domaćinstava kada je u pitanju individualno grejanje, već i postizanje višeg nivoa razumevanja ovog pitanja, u cilju odgovora na izazove koje nosi aktuelna energetska tranzicija. U tom smislu, ova anketa osim težnje da prikupi podatke o osnovnim karakteristikama domaćinstava, karakteristikama sistema grejanja, za cilj je imala i ispitivanje stavova domaćinstava o tranziciji ka održivijim sistemima grejanja i eventualnim preprekama koje se javljaju u praksi. Kao što se može uočiti, grejanje u domaćinstvima predstavlja pojavu kod koje je izražena velika heterogenost i individualnost u donošenju odluka, pa uvek treba težiti povećanju pouzdanosti uzorka i proširivanju sadržaja ankete da bi se složenost činilaca koji utiču na grejanje u domaćinstvu bolje sagledala.

Međutim, i u trenutnom obliku, rezultati ankete mogu predstavljati polaznu osnovu za definisanje instrumenata za ubrzanje energetske tranzicije u sektoru domaćinstava, povećanje energetske efikasnosti i smanjenje uticaja grejanja u domaćinstvima na klimatske promene i lokalno zagađenje.

LITERATURA/REFERENCES

- IRENA, International Renewable Energy Agency, Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050, Abu Dhabi, 2018. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf [pristupljeno 01.03.2022]
- Aalto, P., Haukkala, T., Kilpeläinen, S., Kojo, M. Chapter 1 - Introduction: electrification and the energy transition, in: Aalto, P. *Electrification*, Academic Press, 2021.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, International Cooperation: Agreements and Instruments, in: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press, 2014. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter1_3.pdf [pristupljeno 01.03.2022]
- UN, United Nations, Paris Agreement, 2015. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17853paris_agreement.pdf [pristupljeno 01.03.2022]
- EC, European Commission, The European Green Deal. Brussels, 2019. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_en.pdf [pristupljeno 01.03.2022]
- Jelavić, V., Delija-Ružić, V. Multisektorski pristup u tranziciji prema niskougljičnom razvoju i ciljevima Zelenog akcionog plana EU – iskustva Republike Hrvatske, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 33, No. 3, pp. 26-35, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.26J>
- MRE, Ministarstvo rudarstva i energetike. Krećemo u izradu Nacrta integrisanog nacionalnog plana za energetiku i klimu, 2021. <https://mre.gov.rs/lat/aktuelnosti/saopstenja/mihajlovicewa--krecemo-u-izradu-nacrta-integrisanog-nacionalnog-plana-za-energetiku-i-klimu> [pristupljeno 01.03.2022]
- RS, Republika Srbijam Zakon o energetici, Sl. glasnik RS br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon i 40/2021, Beograd, 2021.
- Eurostat, Final energy consumption by sector, 2021. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00124/default/table?lang=en> [pristupljeno 01.03.2022]
- TOPS, Poslovno udruženje Toplane Srbije, Izveštaj o radu sistema daljinskog grejanja u Republici Srbiji za 2019, Šabac, 2020. https://www.toplansrbije.org.rs/uploads/ck_editor/files/izvestaj%202019%20S.pdf [pristupljeno 01.03.2022]
- RZS, Republički zavod za statistiku, *Anketa o potrošnji domaćinstava 2019*, RZS, Beograd, 2020.
- RZS, Republički zavod za statistiku, *Potrošnja energije u domaćinstvima u RS*, RZS, Beograd, 2021.
- Liu, W., Best, F., Crijns-Graus, W. Exploring the pathways towards a sustainable heating system – A case study of Utrecht in the Netherlands, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 280, 125036, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125036>
- Pavlović, B., Ivezić, D., Živković, M. State and perspective of individual household heating in Serbia: A survey-based study, *Energy and Buildings*, Vol. 247, 111128, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111128>
- Knobloch, F., Pollitt, H., Chewpreecha, U., Daioglou, V., Mercure, J. Simulating the deep decarbonisation of residential heating for limiting global warming to 1.5 °C, *Energy Efficiency*, Vol. 12, pp. 521-550, 2019. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-018-9710-0>
- RZS, Republički zavod za statistiku, *Popis stanovništva 2011*, RZS, Beograd, 2013. <https://publikacije.stat.gov.rs/G2013/Pdf/G20134021.pdf> [pristupljeno 01.03.2022]
- Hu, S., Yan, D., Guo, S., Cui, Y., Dong, B. A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China, *Energy and Buildings*, Vol. 148, pp. 366-378, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.064>
- Pokorni, S. Statistička analiza bezbednosti tehničkih sistema u toku eksploatacije, *Vojnotehnički glasnik*, Vol. 6, pp. 521-533, 2005. <https://doi.org/10.5937/vojtehg0506521P>
- Čurčić, S., Vesković, M., Vujičić, M. Analiza zahteva za korišćenje otpadne drvne i biljne biomase u Srbiji u energetske svrhe, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 33, No. 3, pp. 80-84, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.80C>
- Rikalović, G., Vračarević, B., Molnar, D. Energetska politika kao faktor održivog razvoja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 33, No. 3, pp. 66-72, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.66R>

AUTORI/AUTHORS

msr Boban Pavlović, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, boban.pavlovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-4765-957X](https://orcid.org/0000-0002-4765-957X)
dr Dejan Ivezić, PhD, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, dejan.ivezic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2659-0662](https://orcid.org/0000-0003-2659-0662)
dr Marija Živković, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, marija.zivkovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-5112-8942](https://orcid.org/0000-0001-5112-8942)

Definisanje optimalnog proizvodnog miksa u dekarbonizovanom energetsom sistemu

Definition of the Optimal Generation Mix in Decarbonized Power System

Vladan Ristić^{*,***}, Miljan Žikić^{*}, Dragana Vujanović^{**}, Ivan Trkulja^{*}, Ognjen Mijušković^{*}

^{*} Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“, Kneza Miloša 11, 11000 Beograd, Srbija

^{**} Resalta d.o.o. Beograd, Braće Baruh 24, 11000 Beograd, Srbija

^{***} Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

Rezime - Značajan napredak u ekološkoj svesti široke javnosti u prethodnoj deceniji je doveo do promene načina na koji se sagledava perspektiva elektroenergetskih sistema, pri čemu je najveća prilagođavanja pretrpeo sektor proizvodnje energije, u kome su ulogu koju su držale termoelektrane preuzeli obnovljivi izvori energije. Tu se, prevashodno, ističu solarne elektrane i vetroelektrane. Međutim, ovaj zaokret je dočekan sa velikom dozom skepticizma, gde je, kao argument protiv masovne integracije obnovljivih izvora, često naglašavana varijabilnost njihove snage generisanja, te oscilacije prisutne u njihovom dnevnom dijagramu proizvodnje. Ono što je, pak, zanemarivano u tim izlaganjima jeste činjenica da dnevni dijagram proizvodnje zavisi od tipa izvora, te da, na primer, vetroelektrane i solarne elektrane nemaju identičan dnevni dijagram. Prema tome, do dnevnih maksimuma i minimuma proizvodnje ovih izvora ne dolazi u istom trenutku, te je jasno da bi objedinjeni dijagram na kome bi se u obzir uzela oba tipa elektrana imao daleko manje varijacija snage od pojedinačnih grafika proizvodnje svake od elektrana. Pritom bi stepen smanjenja varijacija, između ostalog, zavisio i od odnosa instalisanih snaga ovih elektrana. Shodno tome, u radu će se sprovesti analiza na test sistemu koji se napaja isključivo iz vetroelektrana i solarnih elektrana, uz uzimanje u obzir dva tipa solarnih panela – monofacijalnih i bifacijalnih. Smatraće se da je zbir instalisanih snaga ovih izvora konstantan, dok će procenat sa kojim svaka od elektrana učestvuje u toj snazi biti variran sa ciljem definisanja onog odnosa instalisanih snaga pri kome dolazi do najmanjih varijacija zbirne snage proizvodnje u periodu od godinu dana, sa satnom rezolucijom. Kao indikator smanjenja varijacija će se koristiti minimalna srednja vrednost kvadrata odstupanja satnih vrednosti ukupne snage generisanja iz opisanih elektrana od prosečne vrednosti snage njihove sumirane proizvodnje na godišnjem nivou.

Ključne reči - Balansiranje sistema, Vetroelektrane, Solarne elektrane, Bifacijalni paneli, Statistička analiza

Abstract - The development of the environmental tendencies in the previous decade led to the alteration of the way in which the perspective of the power systems is seen, where the largest number of adaptations was made to the sector of energy production, in which the role that was occupied by the thermal

plants was taken over by the wind and solar plants. However, this change was met with a dose of scepticism, where the variability of the generation power of these plants and the oscillations in their daily production diagram were commonly listed as the arguments against the massive integration of these sources. What was neglected, nonetheless, is the fact that the daily production diagram depends on the type of the source, so the diagrams of the wind and solar plants, for instance, are not identical. Hence, the daily minimums and maximums of generation power of these units would not occur simultaneously, so the unified diagram of both plants would show less oscillations than their individual diagrams. The level of the variations' reduction would depend on the ratio of the installed capacities of the plants. Therefore, the paper will contain analysis of the test system supplied from the wind and solar plants, with two types of solar panels (monofacial and bifacial) considered. The total installed capacity of these sources will be kept constant, but their share in this amount will be varied in order to define the ratio of the individual installed capacities for which the variations of the total production power on a yearly level is minimal. As the indicator of the variations' reduction, the minimal mean square deviation of the total hourly production powers from their yearly average will be selected.

Index Terms - System balancing, Wind plants, Solar plants, Bifacial panels, Statistical analysis

I UVOD

Održivost trenutnog sagledavanja koncepta elektroenergetskih sistema je, kao što je već i poznato, postala predmet velikog broja kako stručnih, tako i laičkih diskusija, u skladu sa čime su i zaključci takvih razmatranja, prema interesovanjima i interesima samih učesnika, izraženo raznoliki. Ipak, ukoliko bi se potražila jedna stavka oko koje postoji makar koliki konsenzus, to bi skoro zasigurno bila želja za postepenim gašenjem termoelektrana, čiji se uticaj na efekat staklene bašte i na globalno zagrevanje smatra veoma značajnim, te okretanje ka drugim vidovima proizvodnje električne energije, gde bi se, prema trenutnom stepenu razvoja, na prvo mesto mogle staviti vetroelektrane i solarne elektrane.

Naravno, kao što je kroz istoriju i bio slučaj sa većinom noviteta, i prilikom inicijalnih pokušaja široke implementacije obnovljivih

izvora se vodio veliki broj polemika o svemu od sposobnosti tog tipa izvora za održavanje stabilne proizvodnje, pa do posledica koje bi rasprostranjenija primena tih generatora imala na ostatak elektroenergetskog sistema. Neke od strepnji koje su se javljale u široj javnosti pre nego što su ovi izvori postali opšteprihvaćeni su na pregledan način sumirane u [1]. Mora se napomenuti da ovaj članak ni na koji način ne predstavlja naučni rad, ali da zbog toga i predstavlja odličan način da se stekne uvid u način razmišljanja populacije suočene sa prethodno nepoznatom tehnologijom.

U argumentovanim raspravama na temu integracije obnovljivih izvora u sisteme, kao jedan od osnovnih razloga za zabrinutost u vezi sa prelaskom na ovaj tip generatora je veoma često isticana njihova varijabilnost, kao i nemogućnost da se snaga proizvodnje ovih izvora na adekvatan način predvidi za vremenske periode koji bi mogli biti relevantni za normalno funkcionisanje sistema. Taj problem se, pre svega, može povezati sa naglim oscilacijama primarnih energenata koje ovakvi kapaciteti koriste, to jest, sa promenama brzine vetra i jačine sunčevog zračenja na lokaciji na kojoj se nalazi elektrana čiju je proizvodnju potrebno predvideti. U skladu sa ovime, prvu grupu radova koji bi se mogli smatrati važnim za temu o kojoj će biti reči u narednim poglavljima čine radovi koji su se bavili razvojem različitih metoda namenjenih što preciznijem i pouzdanijem predviđanju proizvodnji solarnih elektrana i vetroelektrana. Kao odgovarajući primeri ovih radova bi se mogli navesti radovi [2] i [3], pri čemu su, u prvom od njih, autori razvijali probabilističku tehniku predviđanja generisanja vetroelektrane, baziranu na numeričkim prognozama klimatskih pokazatelja, dok je drugi rad posvećen ispitivanju uticaja koji bi uvažavanje istih ovih vremenskih prognoza imalo na preciznost kratkoročne prognoze snage generisanja solarne elektrane. Pored ova dva rada, treba istaći i rad [4], u kome je prikazan pregled najznačajnijih metoda namenjenih opisanim zadacima.

Naravno, samo pitanje varijabilnosti snage proizvodnje energije u obnovljivim izvorima pokrenulo je i drugo, možda čak i bitnije pitanje, a to je pitanje uticaja koji bi takvo ponašanje generatora moglo imati na ostatak sistema, pri čemu su tu, na prvom mestu, navođeni potrošači čija bi pouzdanost napajanja energijom mogla biti ugrožena ukoliko se ne bi preduzele izvesne mere kojima bi se moglo delovati preventivno i izbeći pomenute posledice. Kada su diskusije na ovu temu uznapredovale, počela je i daleko češća upotreba termina „fleksibilnost elektroenergetskog sistema“, što je dovelo do nastanka nezanemarljivog broja radova koji su se i bavili problemima fleksibilnosti sistema u uslovima diktiranim intenzivnom integracijom obnovljivih izvora električne energije. Takvi su, između ostalih, i radovi [5-8], pri čemu bi rad [7] bilo moguće izdvojiti kao odličnu osnovu za dalja razmišljanja na ovu temu, te ga i preporučiti nekome ko nije prethodno imao kontakta sa pojmom fleksibilnosti sistema, a želeo bi da stekne uvid u ovu izazovnu, ali i jako aktuelnu tematiku. Kao opšte pravilo kog su se, skoro nezavisno od konkretnog razmatranog slučaja, držali radovi koji su se bavili ovim problemima, može se navesti to da su, kao potencijalni izvori fleksibilnosti u elektroenergetskim sistemima, gotovo svaki put pominjani mehanizmi za upravljanje potrošnjom, podizanje sistema za skladištenje električne energije i izgradnja novih interkonektivnih vodova.

Što se, primera radi, sistema za skladištenje električne energije tiče, njihova komplementarnost sa obnovljivim izvorima bi se, u

neku ruku, mogla smatrati i prirodnom. Naime, osnovni problem sa kojim bi se konzum koji bi se energijom napajao isključivo iz obnovljivih izvora suočio bi bila mogućnost da vetra ili sunčevog zračenja naglo nestane, te da snaga proizvodnje tih izvora padne na nultu vrednost. Nasuprot tome, obnovljivi izvori bi mogli biti stavljeni u situaciju da, u slučaju u kom bi njihova proizvodnja bila veća od snage potrošnje u sistemu, nemaju gde da plasiraju generisanu energiju, što bi, sa stanovišta investitora u elektranu, predstavljalo finansijski gubitak. Da bi se ovo izbeglo, sistemi za skladištenje daju opciju da se, u trenucima u kojima proizvodnja nadmašuje potrošnju, višak energije uskladišti kako bi se mogao iskoristiti onda kada potrebe potrošnje prevazilaze raspoloživu snagu generisanja. Time bi se mogli rešiti problemi kako jedne, tako i druge strane, zbog čega je i tema zajedničkog rada sistema za skladištenje i obnovljivih izvora energije takođe uvek aktuelna među autorima istraživanja, kao što su ona opisana u [9-11].

Iako je čvrsto vezan za radove citirane u prošlim pasusima, ovaj rad, ipak, neće biti baziran na istim postulatima kao oni, gde bi se, kao osnovna razlika između njih, moglo naglasiti to što su ti radovi bili zasnovani na saniranju posledica masovne integracije obnovljivih izvora u sistem, dok je ovaj rad formiran na temelju preispitivanja pretpostavke po kojoj bi se za nivelisanje dnevnih dijagrama proizvodnje obnovljivih izvora morale aktivirati neke od eksternih mera. Naime, uzimajući u obzir to da vetroelektrane i solarne elektrane ne koriste isti tip energenta, moglo bi se doći do zaključka da i njihovo ponašanje u toku dana ni u kom slučaju neće biti identično. Shodno tome, moglo bi se zaključiti i to da bi ukupni dijagram proizvodnje ovih elektrana, zavisno od razmere njihovih instalisanih snaga, mogao imati daleko manje varijacije od njihovih pojedinačnih dijagrama, zbog čega temu ovog rada predstavlja definisanje optimalnog odnosa instalisanih snaga tri tipa elektrana (vetroelektrane, monofacijalne i bifacijalne solarne elektrane), tako da se u što većoj meri umanje odstupanja zbirne snage njihove proizvodnje od godišnje prosečne vrednosti. Iako ovo nije prvi rad koji se bavi definisanjem optimalnih odnosa tih elektrana [12-14], autorima nije poznato da je ovakav postupak prethodno sproveden za područje Srednjeg Banata, i to na osnovu podataka merenih na realnoj lokaciji u ovom regionu.

Poglavlje II je posvećeno izlaganju pretpostavki na osnovu kojih je ovaj rad urađen, pri čemu se prvi deo ovog poglavlja odnosi na tipove elektrana čije su snage bile varirane u sklopu sprovedenih analiza, dok se drugi deo odnosi na lokaciju na kojoj su izvršena merenja brzine vetra i jačine sunčevog zračenja koja su korišćena za dalje proračune. Poglavlje III do detalja izlaže metodologiju koja je primenjena pri obavljanju proračuna, počev od estimacije snaga generisanja elektrana koje pripadaju svakom od prethodno opisanih tipova, pa sve do statističke evaluacije odstupanja snaga proizvodnje različitih kombinacija ovih tipova izvora od srednjih godišnjih vrednosti ovih snaga. U nastavku ovoga, Poglavlje IV sadrži prikaz rezultata sprovedenih analiza, dat kako u grafičkoj, tako i u numeričkoj formi, radi veće čitljivosti i jednostavnijeg tumačenja istih, dok je Poglavlje V zapravo poglavlje u kome su navedeni zaključci sprovedenih proračuna, ali je, pored ovoga, napomenuta i namera autora da unaprede urađeno istraživanje, te da takvu nadogradnju implementiraju u neki od narednih radova.

II ULAZNE PRETPOSTAVKE

Kao što je u uvodnom delu rada i napomenuto, ovo poglavlje će

se prevashodno baviti skupom pretpostavki koje su morale biti usvojene pre nego što se krenulo sa vršenjem proračuna čiji će se rezultati razmatrati u nastavku rada i na osnovu kojih će se doći do zaključaka koji će biti predstavljeni u završnom delu teksta. U skladu sa time, za početak je potrebno još jedanput naglasiti koje su tehnologije za proizvodnju električne energije iz obnovljivih energenata obuhvaćene ovim analizama – generisanje električne energije korišćenjem energije vetra i energije sunčevog zračenja.

Naravno, pažljivom čitaocu ne bi promaklo da je u prethodnom delu rada bilo pominjanja tri individualna tipa elektrana, dok su u gornjem pasusu nabrojane svega dve tehnologije za proizvodnju električne energije, te bi se mogao zapitati da li je ovo posledica nepažnje autora ili je tu posredi, ipak, nešto kompleksnije. Tačan odgovor na ovo pitanje je druga od ovih opcija, za šta objašnjenje leži u tome da su, uz vetroelektrane, u nastavku rada razmatrana i čak dva tipa solarnih elektrana, odnosno, elektrane formirane od monofacijalnih i elektrane formirane od bifacijalnih panela. Kao što im samo ime i sugeriše, bifacijalni paneli generišu električnu energiju nezavisno od toga koja od njihove dve strane je izložena sunčevom zračenju. Iako su daleko manje zastupljeni u trenutnoj praksi od standardnih, monofacijalnih panela, ovi paneli pružaju brojne pogodnosti u poređenju sa njima, kao što su, primera radi, bolje korišćenje reflektovane komponente sunčevog zračenja ili, u velikom broju slučajeva, duže trajanje, uzrokovano time što su obe strane bifacijalnih panela otporne na ultraljubičasto zračenje. Tipičan izgled ova dva tipa panela (sa vertikalnim postavljanjem bifacijalnih panela) je dat na Slici 1.



(a)



(b)

Slika 1. Tipičan izgled monofacijalnih (a) i bifacijalnih (b) solarnih panela

Nakon što su tri tipa elektrana koja će biti razmatrana u nastavku rada definisana, može se preći i na pretpostavku načinjenju u vezi sa lokacijom na kojoj bi se ove fiktivne elektrane mogle podići, za šta je, za potrebe ovog rada, odabrana teritorija opštine Sečanj, u regionu Srednjeg Banata, u neposrednoj blizini državne granice Srbije i Rumunije. Ova lokacija, ni u kom slučaju, nije odabrana

nasumično, već na osnovu potencijala za integraciju obnovljivih izvora energije koji može ponuditi eventualnim investitorima, ali i zbog dostupnih merenih realnih vrednosti brzine vetra i jačine sunčevog zračenja. Naime, u ovoj oblasti su, od leta 2012. godine do leta 2013. godine, vršena merenja ova dva pokazatelja, i to sa desetominutnom vremenskom rezolucijom.

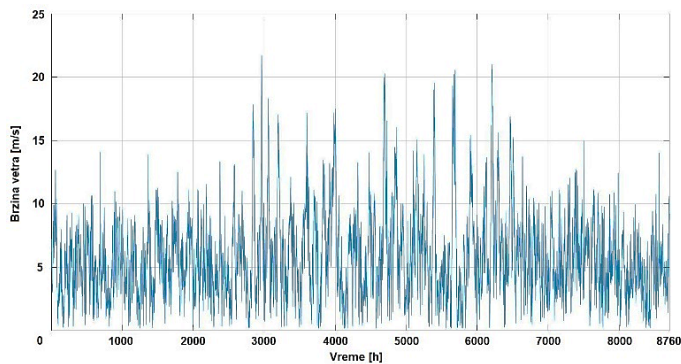
Za potrebe ovog rada je, ipak, smatrano da je dovoljno precizno raditi sa podacima koji imaju satnu vremensku rezoluciju, usled čega je sproveden proces određivanja prosečnih vrednosti brzine vetra i jačine sunčevog zračenja za svaki sat u toku posmatranog jednogodišnjeg intervala. Ovo je rađeno prema formuli (1).

$$X_j = \frac{1}{6} * \sum_{i=1}^6 X_{i,j} \quad (1)$$

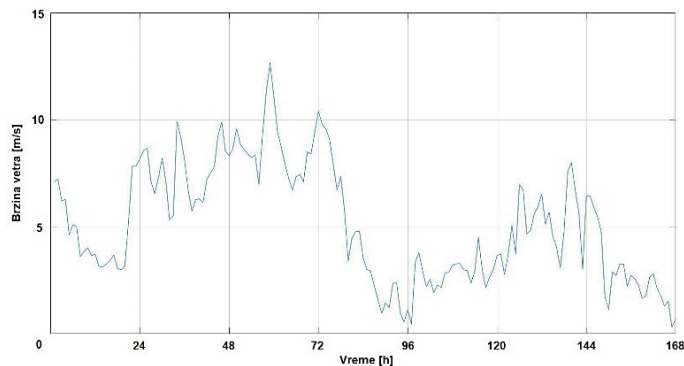
U ovoj formuli, oznake imaju sledeće značenje:

- X – veličina čija se satna prosečna vrednost traži;
- j – sat u toku posmatranog jednogodišnjeg perioda;
- i – oznaka odbirka veličine X u toku sata j .

Primera radi, merene brzine vetra, uprosečene na nivou svakog sata u predmetnom periodu, mogu se videti na Slici 2, čiji prvi deo obuhvata čitav ovaj period, dok drugi deo, radi preglednosti, prikazuje isključivo prvu sedmicu tog perioda.



(a)



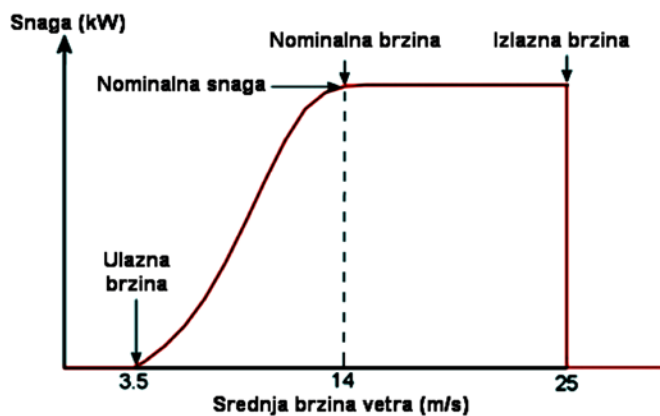
(b)

Slika 2. Uprosečene satne brzine vetra na godišnjem nivou (a) i na sedmičnom nivou (b)

III METODOLOGIJA ZA VRŠENJE PRORAČUNA

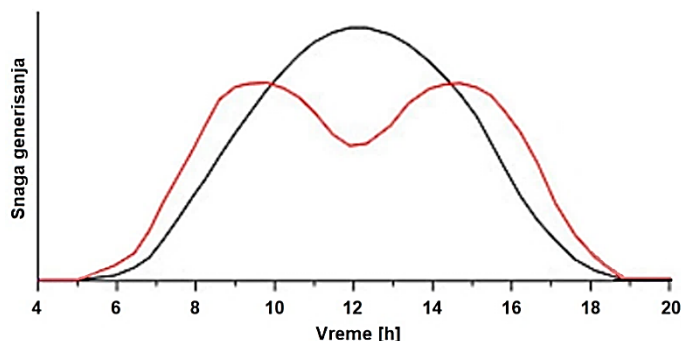
Nakon završetka prvog koraka u obavljanju analiza, opisanog u okviru prethodnog poglavlja, na raspolaganju su se nalazili tipovi

elektrana koje bi se mogle koristiti za predmetne proračune, kao i lokacija na kojoj bi ove elektrane mogle biti podignute, a, shodno tome, i uprosečene satne brzine vetra i jačine sunčevog zračenja na ovoj lokaciji. Naredna faza izrade potrebnih analiza je, stoga, mogla da otpočne konverzijom merenih vrednosti brzine vetra i jačine sunčevog zračenja u odgovarajuće vrednosti proizvodnje energije u pomenutim elektranama. Da bi se ovo moglo uraditi, bilo je potrebno podsetiti se zavisnosti vrednosti generisanja ovih elektrana od njihovih primarnih energenata. Na Slici 3 se, kao adekvatan primer ove zavisnosti, može videti promena vrednosti generisanja tipične vetroturbine sa varijacijama brzine vetra.



Slika 3. Tipični dijagram snage proizvodnje vetroturbine u zavisnosti od brzine vetra

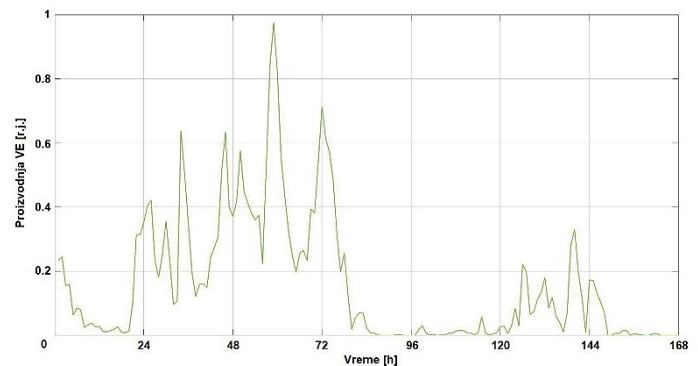
Što se tiče bifacijalnih solarnih panela, dijagram proizvodnje ovih izvora energije od sunčevog zračenja na odabranoj lokaciji zavisi, pre svega, od njihove orijentacije, odnosno, od načina na koji su ovi paneli postavljeni. Za potrebe ovog rada je usvojena pretpostavka da su paneli postavljeni vertikalno, i to tako da im je jedna strana okrenuta ka istoku, a druga ka zapadu. Dijagram proizvodnje tako okrenutih panela je karakterističan po tome što ima dva maksimuma, jedan pre, a drugi nakon podneva, kao što se i može videti na Slici 4, naznačeno crvenom bojom. Poređenja radi, na ovom dijagramu je crnom bojom označen dijagram koji bi odgovarao monofacijalnim panelima iste instalisane snage.



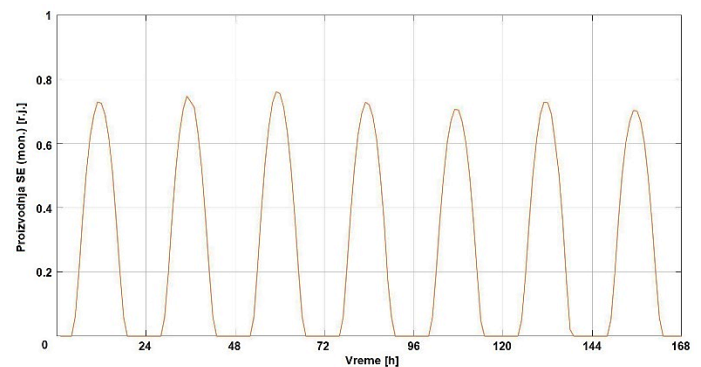
Slika 4. Tipični dijagram dnevne proizvodnje monofacijalnih i bifacijalnih solarnih panela

U skladu sa onim što je naglašeno kako u rezimeu, tako i u uvodu ovog rada, cilj istog je bilo definisanje optimalnog međusobnog odnosa instalisanih snaga razmatrane tri elektrane, što je značilo i da je ove snage bilo neophodno varirati u toku vršenja proračuna.

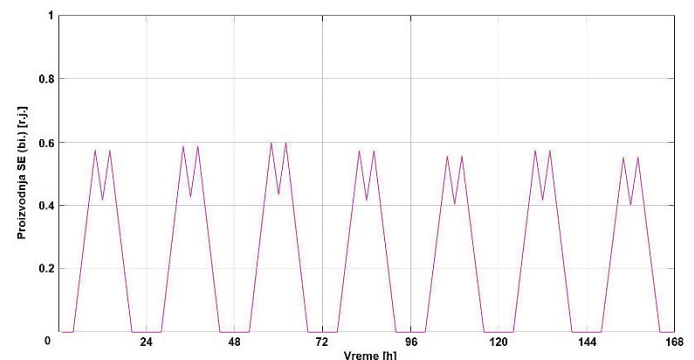
Kako bi se to što više olakšalo, na početku vršenja analiza je bilo potrebno definisati snage proizvodnje ovih elektrana za svaki sat u godini, pri čemu je uzeto da je instalisana snaga svake od njih jedinična, to jest, jednaka jednoj relativnoj jedinici. Na Slikama 5, 6 i 7 su, istim redom, dati iznosi snaga generisanja jedinične vetroelektrane, jedinične solarne elektrane sastavljene isključivo od monofacijalnih panela i jedinične solarne elektrane formirane isključivo od bifacijalnih panela, gde je, radi bolje preglednosti, posmatrana samo prva sedmica predmetne godine.



Slika 5. Snaga proizvodnje jedinične vetroelektrane u prvoj sedmici posmatranog perioda



Slika 6. Snaga proizvodnje jedinične solarne elektrane (mon.) u prvoj sedmici posmatranog perioda



Slika 7. Snaga proizvodnje jedinične solarne elektrane (bi.) u prvoj sedmici posmatranog perioda

Kada je izračunavanje jediničnih snaga proizvodnje bilo gotovo, moglo se otpočeti sa varijacijom instalisanih snaga razmatranih elektrana, pri čemu je usvojena još jedna pretpostavka, po kojoj je ukupan broj jedinica svih tipova bio, u svakom slučaju, jednak 100, dok je smatrano da je snaga jedne jedinice, ma kog tipa, bila

jednaka 10 kW. U skladu sa time, zbirna instalisana snaga sve tri elektrane je ostajala jednaka 1 MW, bez obzira na odnos njihovih instalisanih snaga. Zatim su isprobavane sve kombinacije brojeva jedinica po tipovima proizvodnih kapaciteta, tako da je na kraju bilo moguće odrediti onaj odnos proizvodnih kapaciteta pri kome je dolazilo do najmanjih odstupanja zbirne snage proizvodnje od njenog godišnjeg proseka. Za svaki sat, snaga proizvodnje svake elektrane je izračunata množenjem njoj odgovarajuće jedinične snage proizvodnje usvojenom instalisanom snagom proizvodne jedinice od 10 kW i brojem tih jedinica u sagledanoj kombinaciji. Zatim je zbirna satna vrednost generisanja određivana sabiranjem snaga proizvodnji sve tri elektrane u tom satu, da bi, nakon toga, godišnji prosek snaga proizvodnje za posmatranu kombinaciju bio određen u skladu sa obrascem (2).

$$P_{avg} = \frac{1}{8760} * \sum_{j=1}^{8760} P_{g,j} \quad (2)$$

U ovom obrascu, simboli imaju značenje dato ispod:

- P_{avg} – godišnji prosek zbirne snage proizvodnje [kW];
- j – sat u toku posmatranog jednogodišnjeg perioda;
- $P_{g,j}$ – zbirna snaga proizvodnje u satu j [kW].

Konačno, za svaku od ovih kombinacija je bilo potrebno odrediti i statistički pokazatelj po kome su kombinacije bile ocenjivane, a potom i rangirane. To je, ovaj put, bila srednja vrednost kvadrata odstupanja satnih vrednosti ukupne snage generisanja iz opisanih elektrana od prosečne snage njihove sumirane proizvodnje na godišnjem nivou, izračunavana prema formuli (3).

$$\Delta = \frac{1}{8760} * \sum_{j=1}^{8760} (P_{g,j} - P_{avg})^2 \quad (3)$$

Upravo je ona kombinacija instalisanih snaga elektrana pri kojoj je dobijena minimalna vrednost pokazatelja definisanog izrazom (3) proglašena optimalnom sa aspekta urađene analize, o čemu će nešto više diskusije biti u narednom poglavlju.

IV DOBIJENI REZULTATI

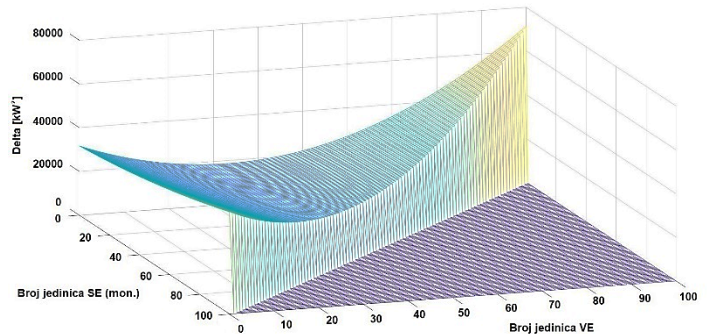
U Tabeli 1 i na Slici 8 se, tim redom, mogu videti kako tabelarni, tako i grafički prikaz rezultata dobijenih sprovedenom analizom, pri čemu Tabela 1 pruža uvid u numeričke vrednosti instalisanih snaga pri kojima bi, prema dobijenim rezultatima, dolazilo do minimalnog srednjeg odstupanja snage od godišnjeg proseka. Sa druge strane, Slika 8 ilustruje varijaciju ovog pokazatelja zavisno od odabrane kombinacije instalisanih snaga, pri čemu su na dve horizontalne ose date instalisane snage vetrolektrane i solarne elektrane formirane od monofacijalnih solarnih panela, gde bi se snaga preostale elektrane mogla lako odrediti na osnovu ove dve.

Tabela 1. Tabelarni prikaz optimalnih instalisanih kapaciteta

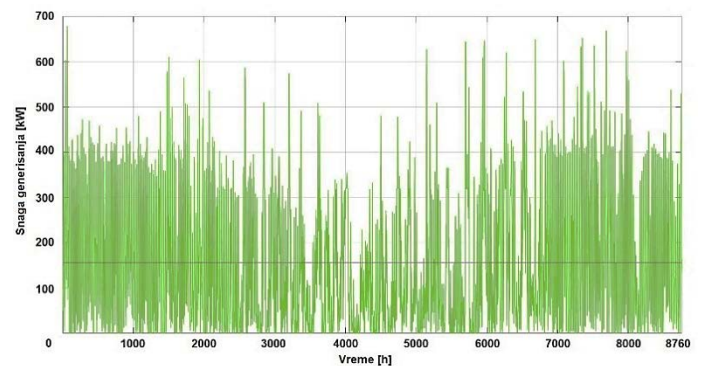
Tip elektrane	Instalisana snaga [kW]
Vetrolektrana	320
Solarna elektrana (mon.)	0
Solarna elektrana (bi.)	680

Kao što se može videti iz prikazanih rezultata, u ovom slučaju je dobijeno da optimalna kombinacija instalisanih snaga kapaciteta ne bi trebalo da sadrži monofacijalne solarne panele, pri čemu se

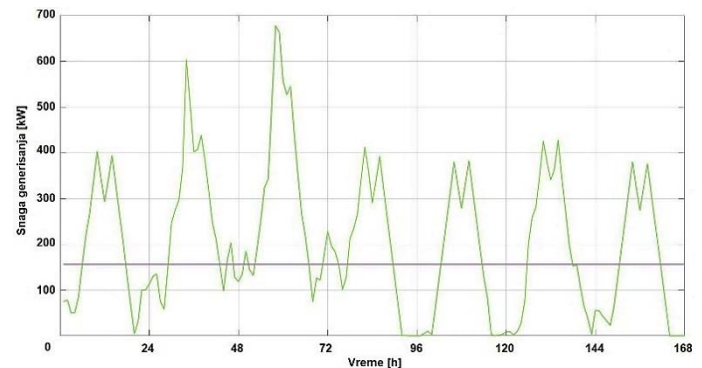
u toj varijanti dobija da je iznos pokazatelja Δ jednak 18614 kW². Mora se napomenuti da ove rezultate ne treba posmatrati kao bilo kakvo univerzalno pravilo, posebno ako se uzme u obzir njihova striktna povezanost sa usvojenim skupom ulaznih pretpostavki, ali da mogu biti protumačeni kao pokazatelj važnosti obavljanja prikazanih proračuna za realne situacije, sa preciznim merenim podacima u još dužim vremenskim intervalima. Slika 9 prikazuje zbirnu snagu proizvodnje pri optimalnoj kombinaciji instalisanih snaga. Gornji deo slike se odnosi na čitav jednogodišnji period, dok donji deo slike pokazuje prvu sedmicu tog perioda. Na oba dela ove slike je ljubičastom linijom označena prosečna vrednost godišnje snage proizvodnje, dobijena za optimalni odnos snaga.



Slika 8. Zavisnost godišnjeg odstupanja snage proizvodnje od kombinacije instalisanih kapaciteta



(a)



(b)

Slika 9. Optimalne snage proizvodnje energije na godišnjem nivou (a) i na sedmičnom nivou (b)

V ZAKLJUČAK

Kao što je u uvodnom delu i navedeno, ciljem ovog rada se može smatrati definisanje optimalnog odnosa instaliranih snaga tri tipa elektrana baziranih na obnovljivim energentima – vetroelektrane, monofacijalne solarne i bifacijalne solarne elektrane, tako da se u najvećoj mogućoj meri smanje oscilacije njihove kombinovane snage proizvodnje u toku jednogodišnjeg perioda. Naravno, da bi se ovo realizovalo, bilo je potrebno, pre bilo kog drugog koraka, usvojiti odgovarajući skup ulaznih pretpostavki, od kojih su se neke odnosile na samu lokaciju na kojoj bi ove fiktivne elektrane mogle biti podignute, dok su se druge pretpostavke odnosile na karakteristike analiziranih elektrana.

Nakon usvajanja neophodnih ulaznih pretpostavki, naredni korak je predstavljalo računanje satnih vrednosti proizvodnji jediničnih elektrana za svaki od tipova izvora obuhvaćenih ovim radom, što je urađeno kako bi se olakšalo određivanje satnih vrednosti snaga proizvodnji tih elektrana nakon što je otpočelo variranje njihovih instaliranih snaga. Upravo je predmetno variranje, u kombinaciji sa primenom odgovarajuće formule iz domena statistike, služilo za estimaciju optimalnog odnosa instaliranih snaga elektrana, pri čemu se još jednom mora naglasiti da su dobijeni rezultati validni isključivo za razmatrani skup ulaznih podataka, te da bi promena ovih podataka neizbežno dovela i do promene rezultata. Shodno tome, date rezultate ne treba shvatati doslovce, već kao indikator važnosti koju bi vršenje ovakvih proračuna potencijalno moglo imati za integraciju obnovljivih izvora energije u sisteme.

Ovaj rad se, pored toga što sadrži pomenutu statističku analizu, može smatrati i stabilnom osnovom za dalja istraživanja koja bi se mogla uraditi na teme slične ovoj, pri čemu je namera autora da prvi naredni rad bude baziran na proračunavanju optimalnog odnosa instaliranih snaga ovih proizvodnih kapaciteta tako da se kriva njihove zbirne proizvodnje na godišnjem nivou u što većoj meri poklopi sa promenama potrošnje, kako bi se još više istakao praktični značaj ovih i sličnih analiza za olakšano funkcionisanje elektroenergetskih sistema u budućnosti.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Tajne, P. The Dark Side of Renewable Energy: Negative Impacts of Renewables on the Environment, *Alternative Energy Magazine*, 2015. Dostupno na: <https://www.altenergymag.com/article/2015/08/the-dark-side-of-renewable-energy-negative-impacts-of-renewables-on-the-environment/20963/> [pristupljeno 17.03.2021].
- [2] Li M., Yang, M., Yu, Y., Li, P., Si, Z., Yang, J. Wind Power Probabilistic Forecasting Based on Wind Correction Using Weather Research and Forecasting Model, in *Proc. 2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*, Jinan, China, pp. 619-624, 4-6. December 2020. <https://doi.org/10.1109/SCEMS48876.2020.9352362>
- [3] Zhong, Y.-J., Wu, Y.-K. Short-Term Solar Power Forecasts Considering Various Weather Variables, in *Proc. 2020 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, Taichung City, Taiwan, pp. 432-435, 13-16. November 2020. <https://doi.org/10.1109/IS3C50286.2020.00117>
- [4] Prema, V., Bhaskar, M.S., Almakhles, D., Gowtham, N., Rao, K.U. Critical Review of Data, Models and Performance Metrics for Wind and Solar Power Forecast, *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 667-688, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137419>
- [5] Ginsberg, M., Goeta, S., Fthenakis, V. Grid Flexibility and the Cost of Integrating Variable Renewable Energy: Toward a Renewable Energy Integration Adder for San Diego Gas and Electric Service Territory and the California Electric Grid, in *Proc. 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*, Waikoloa, HI, USA, pp. 1402-

1405, 10-15. June 2018.

- <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547842>
- [6] Pedersen, T.T., Victoria, M., Rasmussen, M.G., Andersen, G.B. Exploring flexibility of near-optimal solutions to highly renewable energy systems, in *Proc. 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Fort Lauderdale, FL, USA, pp. 387-391, 20-25. June 2021. <https://doi.org/10.1109/PVSC43889.2021.9518745>
- [7] Wu, Y., Li, Y., Wu, Y. Overview of power system flexibility in a high penetration of renewable energy system, in *Proc. 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, Chiba, Japan, pp. 1137-1140, 13-17. April 2018. <https://doi.org/10.1109/ICASI.2018.8394484>
- [8] Xing, T., Caijuan, Q., Liang, Z., Pengjiang, G., Jianfeng, G., Panlong, J. A comprehensive flexibility optimization strategy on power system with high-percentage renewable energy, in *Proc. 2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Chengdu, China, pp. 553-558, 20-23. September 2017. <https://doi.org/10.1109/ICPRE.2017.8390596>
- [9] Byers, C., Botterud, A. Additional Capacity Value From Synergy of Variable Renewable Energy and Energy Storage, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 11, No. 2, pp. 1106-1109, 2020. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2940421>
- [10] Wang, Z. et al. Research on the active power coordination control system for wind/photovoltaic/energy storage, in *Proc. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, China, pp. 1-5, 26-28. November 2017. <https://doi.org/10.1109/EI2.2017.8245403>
- [11] Shi, Z., Wang, W., Huang, Y., Li, P., Dong, L. Simultaneous optimization of renewable energy and energy storage capacity with the hierarchical control, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 95-104, 2022. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.01470>
- [12] Vuc, G., Borlea, I., Barbulescu, C., Prostean, O., Jigoria-Oprea, D., Neaga, L. Optimal energy mix for a grid connected hybrid wind — Photovoltaic generation system, in *Proc. 2011 IEEE 3rd International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources (EXPRES)*, Subotica, Serbia, pp. 129-132, 11-12. March 2011. <https://doi.org/10.1109/EXPRES.2011.5741806>
- [13] Nassar, M.E., Salama, M.M.A. Optimal sizing of wind/solar mix for supply security of active power distribution systems, in *Proc. 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 1-4, 15-18. May 2016. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2016.7726803>
- [14] Waiwong, S., Damrongkulkarnjorn, P. Optimal sizing for stand alone power generating system with wind-PV-hydro storage by mixed-integer linear programming, in *Proc. 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Birmingham, UK, pp. 437-441, 20-23 November 2016. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2016.7884375>

AUTORI/AUTHORS

Vladan Ristić - master inženjer elektrotehnike i računarstva, šef Službe za planiranje razvoja prenosnog sistema u AD „Elektromreža Srbije“, vladagenius.vr@gmail.com, ORCID [0000-0001-9571-3238](https://orcid.org/0000-0001-9571-3238);

Miljan Žikić - master inženjer elektrotehnike i računarstva, šef Službe za planiranje i praćenje realizacije investicionih planova u AD „Elektromreža Srbije“, miljan.zikic@ems.rs, ORCID [0000-0002-9189-5377](https://orcid.org/0000-0002-9189-5377)

Dragana Vujanović - master inženjer elektrotehnike i računarstva, viši inženjer u Resalta d.o.o. Beograd, draganav.1995@gmail.com, ORCID [0000-0002-3516-4457](https://orcid.org/0000-0002-3516-4457)

Ivan Trkulja - diplomirani inženjer elektrotehnike, rukovodilac Sektora za razvoj prenosnog sistema u AD „Elektromreža Srbije“, ivan.trkulja@ems.rs, ORCID [0000-0002-3584-7661](https://orcid.org/0000-0002-3584-7661)

Ognjen Mijusković - diplomirani inženjer elektrotehnike i računarstva, inženjer za planiranje razvoja prenosnog sistema u AD „Elektromreža Srbije“, ognjen.mijuskovic@ems.rs, ORCID [0000-0002-9742-391X](https://orcid.org/0000-0002-9742-391X)

Sistem napajanja i pametno upravljanje poljoprivrednim zemljištem korišćenjem obnovljivih izvora energije

Power Supply System and Smart Management of Agriculture Land Using Renewable Energy Sources

Željko Despotović, Aleksandar Rodić, Ilija Stevanović

*Institut „Mihajlo Pupin“, Univerzitet u Beogradu

Rezime - U radu je predstavljena realizacija sistema napajanja baziranog na obnovljivim izvorima energije (sunce i vetar) koji se koristi za navodnjavanje povrtnarskih kultura i za pametno upravljanje poljoprivrednog zemljišta na parceli od 10ha na lokaciji mesta „Belegiš“. Rezultati predstavljeni u ovom radu su deo projekta Instituta „Mihajlo Pupin“, "Pametno upravljanje poljoprivrednim zemljištem i prirodnim resursima korišćenjem savremenih tehnologija". Projekat je podržan od strane Razvojne agencije Ujedinjenih Nacija (UN) i Ministarstva zaštite životne sredine Republike Srbije. Realizovano tehničko rešenje je nagrađeno je kao jedno od 11 najboljih inovativnih i klimatski pametnih rešenja u okviru programa "Lokalni razvoj otporan na klimatske promene" koji Program Ujedinjenih nacija za razvoj (UNDP) sprovodi u partnerstvu sa Ministarstvom zaštite životne sredine, uz finansijsku podršku Globalnog fonda za životnu sredinu (GEF). U okviru sistema napajanja su realizovani solarna elektrana snage izlazne snage 8kW, vetrogeneratorski (VGS) sistem snage 0.5kW, baterijska banka 48Vdc/720Ah, kao primarni izvori napajanja i dizel električni agregat (DEA) snage 7.5kW kao pomoćni izvor napajanja. Pored ovog sistema napajanja je realizovan i sistem za daljinsko upravljanje navodnjavanjem i pametnim upravljanjem zemljištem i prirodnim resursima. Projekat je pored pomenutih sistema obuhvatio i sistem zaštite od atmosferskih pražnjenja i kompletan sistem video nadzora na datoj parceli.

Ključne reči – energetika, održivi razvoj, obnovljivi izvori energije, navodnjavanje, poljoprivredu, električno napajanje

Abstract - The paper presents the realization of a power supply system based on renewable energy sources (sun and wind) which is used for irrigation of vegetable crops and for smart management of agricultural land on a plot of 10 ha at the location of the village "Belegiš". The results presented in this paper are part of the project of the Mihajlo Pupin Institute, "Smart management of agricultural land and natural resources using modern technologies". The project is supported by the United Nations Development Agency and the Ministry of Environment of Republic Serbia. The implemented technical solution was awarded as one of the 11 best innovative and climate-smart solutions within the program "Local Development Resistant to Climate Change" implemented by the United Nations Development Program (UNDP) in partnership with the Ministry of Environment, with financial support from the Global

Environment Fund (GEF). Within the power supply system are realized the solar power plant with an output power of 8 kW, the wind generator system with a power of 0.5 kW and battery bank of 48 Vdc / 720Ah, as primary power sources and a diesel electric generator (DEA) with a power of 7.5 kW as an auxiliary power source. In addition to this power supply system, a system for remote management of irrigation and smart management of land and natural resources has been implemented. In addition to the mentioned systems, the project also included a system of protection against atmospheric discharges and a complete video surveillance system on a given plot.

Index Terms – Energy, Sustainable development, Renewable energy sources, Irrigation, Agriculture, Power supply system

I UVOD

Porast broja stanovništva na Zemlji, uticaj klimatskih promena, sve veće industrijsko i komunalno zagađenje sa jedne strane i razvoj naučnih i tehnoloških dostignuća u poljoprivredi sa druge strane, uslovljavaju dinamičan razvoj ovog sektora. Rast svetske populacije i shodno tome porast zahteva za hranom i prehrambenim proizvodima su u suprotnosti sa činjenicama da se zbog klimatskih promena i njihovih neposrednih posledica (suše i poplave, zagađenja zemljišta, vode i vazduha), obradivo poljoprivredno zemljište stalno smanjuje [1-3]. Pored ovoga demografska kretanja su takvog karaktera da značajnije raste broj stanovnika u urbanim sredinama, dok je u ruralnim i seoskim sredinama naseljenost veoma mala. Ove činjenice dovode do disproporcije između zahteva i mogućnosti poljoprivredne proizvodnje. Dodatni problem predstavlja činjenica da je u selima radne snage sve manje [4-6].

Poslednjih decenija beleži se rast koncentracija gasova staklene bašte koji su prirodni deo atmosfere. Osim vodene pare, najznačajniji gasovi sa efektom staklene bašte su ugljen-dioksid CO₂, koji je odgovoran za oko 60% od ukupne dodatno proizvedene toplote, metan (oko 20%), hloro-fluoro ugljenici (oko 10%), azot-suboksid N₂O (oko 6%) i troposferski ozon (oko 2%). Procene pokazuju da sektor poljoprivrede, šumarstva i korišćenja zemljišta na globalnom nivou emituje nešto manje od četvrtine ukupnih antropogenih emisija gasova staklene bašte, ugrožavajući na ovaj način resurse od kojih je direktno zavisno [7].

Poljoprivreda je jedna od ključnih komponenti ekonomskog razvoja Republike Srbije jer, osim ekonomskog, ima i izražen socijalni i ekološki značaj. Međutim, poljoprivreda u Srbiji se još uvek u značajnoj meri odvija na tradicionalan način, bez uvođenja savremenih znanja i agrotehničkih mera primerenih razvijenim i ekološki-svesnim državama. Tamo gde se i primenjuju agrotehničke mere, to se radi na neracionalan i ekonomski neodrživ način. Kao primer može se navesti mera navodnjavanja useva, koja je u uslovima klimatskih promena ključna karika u lancu proizvodnje. Iako se u Srbiji navodnjava samo oko 2% korisnog poljoprivrednog zemljišta, ova agrotehnička mera se izvodi mahom uz primenu agregata na fosilna goriva (benzin i dizel), koji sagorevanjem oslobađaju štetne gasove koji odlaze u atmosferu i pojačavaju efekte staklene bašte, zagađuju ekosistem i na taj način uzrokuju značajne ekonomske gubitke.

Globalna potražnja za energijom je u stalnom porastu i ona će se povećati za 40-50% do kraja 2035 godine, a zemlje koje su na sadašnjem nivou u razvoju, će činiti većinu ove potražnje [8]. Očekuje se da će fosilna goriva nastaviti da ispunjavaju najveći deo potreba, kao primarni izvor energije. Međutim, upotreba obnovljive energije se stalno povećava i imaće svakako trend rasta u budućnosti.

Kombinacija odgovarajućih energetske tehnologije, opreme i objekata u poljoprivrednom sektoru su neophodni kako bi se napravio postepeni prelazak sa postojećih tradicionalnih na energetske pametne sisteme. Ovi sistemi imaju najznačajniju primenu u sistemima navodnjavanja, sistemima za proizvodnju hrane i sl. Sinergija pomenutih tehnologija i objekata zavisiće od prirodnih uslova, infrastrukture i veština dostupnih radnoj snazi. Postoje mnoge tehnologije koje mogu biti deo energetske pametnih (tzv. „energy smart“) poljoprivrednih sistema uključujući implementaciju sledeće opreme: solarnih panela, vetroturbina, solarnih kolektora, jedinica za proizvodnju biogasa, opreme za ekstrakciju i prečišćavanje bio ulja, postrojenja za fermentaciju i destilaciju, postrojenja za proizvodnju etanola, jedinice za pirolizu, oprema za hidro-termalnu konverziju energije, pumpe za navodnjavanje, sistemi za nadzor i upravljanje bazirani na savremenim informaciono-komunikacionim tehnologijama (IKT) i sl. Pomenute tehnologije dodatno dovode do povećanja proizvodnje u blizini izvora sirovina [9].

U ovom radu je predstavljena jedna realizacija sistema hibridnog napajanja pretežno baziranog na obnovljivim izvorima energije (OIE), odnosno na energiji sunca i vetra, koji se koristi za navodnjavanje povrtarskih kultura i za pametno upravljanje poljoprivrednog zemljišta na parceli od 10 ha na lokaciji mesta „Belegiš“. Pored obnovljivih izvora u sistemu je upotrebljen dizel-električni generator, kao rezervni izvor napajanja, tako da je njegova upotreba ograničena jedino na vremenske intervale kada je proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora niska, ili kada su obnovljivi izvori u totalnom deficitu.

Između ostalog, u radu su predstavljeni rezultati, koji su bili deo projekta Centra za robotiku, Instituta „Mihajlo Pupin“ pod nazivom: „Pametno upravljanje poljoprivrednim zemljištem i prirodnim resursima korišćenjem savremenih tehnologija“, period 2018.-2021. Projekat je bio podržan od strane Razvojne

agencije Ujedinjenih Nacija (UN) i Ministarstva zaštite životne sredine Republike Srbije. Realizovano postrojenje na lokaciji mesta „Belegiš“ je nagrađeno je kao jedno od 11 najboljih inovativnih i klimatski pametnih rešenja u okviru programa „Lokalni razvoj otporan na klimatske promene“ koji Program Ujedinjenih nacija za razvoj (UNDP) sprovodi u partnerstvu sa Ministarstvom zaštite životne sredine, uz finansijsku podršku Globalnog fonda za životnu sredinu (GEF). U okviru sistema napajanja iz obnovljivih izvora energije su realizovani: (1) solarna elektrana izlazne snage 8kW, (2) VGS sistem izlazne snage 1kW, (3) baterijska banka 48Vdc/720Ah, kao primarni izvori napajanja i (4) dizel električni agregat (DEA) snage 7.5kW kao rezervni izvor napajanja.

Pored ovog sistema napajanja realizovan je sistem za regulaciju pritiska u cevovodu sistema za navodnjavanje baziran na frekventnoj regulaciji pogonskog elektromotora pumpe za navodnjavanje i sistem za daljinsko upravljanje navodnjavanjem i pametnim upravljanjem zemljištem i prirodnim resursima na datoj lokaciji. Projekat je pored pomenutih sistema obuhvatio i sistem zaštite od atmosferskih pražnjenja i kompletan sistem video nadzora na poljoprivrednoj parceli.

II TEHNIČKI OPIS SISTEMA

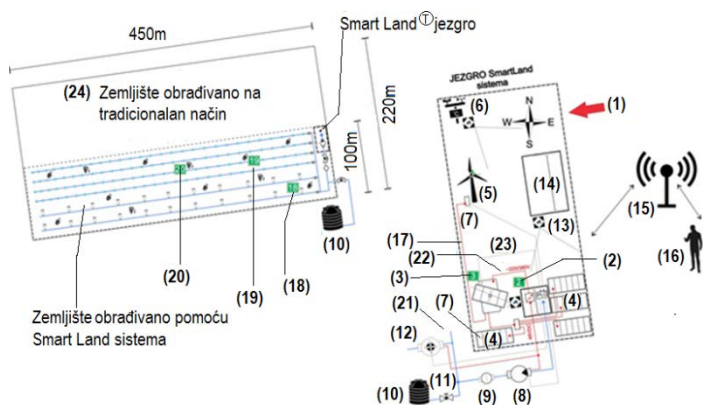
Na poljoprivrednom porodičnom gazdinstvu u selu Belegiš, na parceli obradivog zemljištu površine od oko 10 hektara podignut daljinski komandovan sistem za pametnu, ekološku i ekonomski održivu proizvodnju (tzv. „Smart Land“ sistem). Sistem napajanja („Off Grid“) je u najvećem delu baziran na iskorišćenju i konverziji energije iz obnovljivih izvora (sunce i vetar), koja se prvenstveno koristi za sistem navodnjavanja na datoj parceli. U okviru sistema je realizovan digitalizovani pametni sistem za navodnjavanje, kao i sofisticirana regulacija pritiska u zalivnom sistemu čime je obezbeđen energetske efikasan rad pumpnog postrojenja, čime je značajno poboljšana i efikasnost kompletnog sistema napajanja.



Slika 1. Pogled na „Smart Land“ postrojenje za daljinsko upravljanje proizvodnjom na porodičnom poljoprivrednom gazdinstvu u Belegišu – pogled na parcelu (gore) i pogled na samo napojno postrojenje bazirano na OIE (dole).

Na Slici 1 je dat prikaz pozicije pametnog postrojenja za napajanje i daljinsko upravljanje sistema za navodnjavanje, izgled samog napojnog postrojenja i položaj parcele od oko 10 hektara.

Na Slici 2 je ilustrovana principiska funkcionalna šema postrojenja i navedeni su svi funkcionalni elementi koji čine ovaj pametni sistem. Rešenje se sastoji od: (a) sistema hibridnog napajanja, odnosno mini elektrane, koja kombinuje energiju sunca i vetra, uz prisustvo isključivo rezervnog napajanja obezbeđenog iz dizel električnog agregata (DEA), (b) centralizovanog informacionog sistema koji upravlja sistemom za navodnjavanje i tečnom prihranom useva, štedeći vodene resurse i preparate, (c) distribuirane bežične senzorske mreže za praćenje stanja zemljišta i useva (temperatura, vlažnost, pH vrednost i električna provodnost), (d) digitalne meteorološke stanice. Pored ovih glavnih sistema, u okviru postrojenja su obezbeđeni sistemi zaštite od atmosferskih pražnjenja, sistem uzemljenja, sistem sekundarne prenaponske zaštite i sistem daljinskog video nadzora postrojenja.



Slika 2. Funkcionalna šema „Smart Land“ postrojenja (sa Slike 1) za daljinski nadzor i upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom na otvorenoj poljoprivrednoj parceli u Belegišu

Pomenuti elementi postrojenja su detaljnije prikazani na Slici 2, a u nastavku se daje detaljnije značenje pojedinih pozicija: (1) Ulaz u zaštićeni prostor „Smart Land“ gazdinstva, (2) arteški bunar uključujući pumpno postrojenje sa razvodnim ormanom pumpe i baznom stanicom u okviru njega, (3) Mobilni automatizovani solarni generator *MobiSun – Pro Energy* [10-12], (4) Stacionarni PV sistemi od dve grupe, svaka od 12 solarnih panela, ukupne snage 6kW (5) Mini vetroturbina snage 500W/48VDC, (6) Digitalna meteorološka stanica, (7) DC sabirni razvodni elektro orman grupe PV panela, (8) Potapajuća pumpa za vodu izlazne mehaničke snage 3kW, (9) Filter za otklanjanje nečistoća iz vode, (10) Rezervoar za tečno đubrivo i fito-zaštitne preparate, (11) Nepovratni ventil pumpe, (12) Elektromagnetni ventili sistema za navodnjavanje, (13) Video nadzor, (14) Pomoćni ekonomski objekat, (15) GSM/GPRS antena, (16) Čovek-operator sa personalnim uređajem, (17) Ograda jezgra „Smart Land“ sistema, (18) Rasprskivački uređaji sistema za navodnjavanje, (19) Senzori temperature i vlažnosti vazduha i zemljišta [13], (20) Senzor pH vrednosti zemljišta [13], (21) Vodovodni cevovod sistema za navodnjavanje, (22) Elektroenergetske kablovske instalacije, (23) Upravljačke

instalacije za prenos signala, (24) Zemljište poljoprivrednog gazdinstva u ataru sela Belegiš.

III POTROŠAČI U SISTEMU NAVODNJEVANJA

Na Slici 3 je prikazana principiska blok šema hibridnog sistema napajanja (sunce, vetar, DEA) elektroenergetskih modula koji se koriste u sistemu navodnjavanja. Sistem napajanja je baziran na uređajima energetske elektronike u okviru koga su zastupljeni svi tipovi elektroenergetskog pretvaranja električne energije (DC/DC, DC/AC, AC/DC) [14-16]. Optimizacija proizvodnje energije iz ovog hibridnog sistema je izvršena u skladu sa sofisticiranim algoritmom koji je predložen u referenci [17].

Hibridni sistem napajanja obezbeđuje posredstvom, frekventnog regulatora +FR regulisani pogon trofaznog elektromotora potapajuće pumpe napona. Glavnim projektom je odabrana potapajuća pumpa firme PEDROLLO, tip 4SR10-15. Optimalna radna tačka pumpe na H-Q dijagramu pri maksimalnoj snazi od $P_2=3$ kW pri maksimalnom stepenom iskorišćenja od $\eta=63\%$, se dobija za maksimalni napor pumpe $H^*=70$ m i za maksimalni protok od oko $Q^*=160$ l/min, što zadovoljava sve zahteve navodnjavanja na pomenutoj parceli [18]. Pogonski elektromotor pumpe je trofazni asinhroni napona 3x400/230V, 50Hz, maksimalne ulazne električne snage $P_1=4,8$ kW. Nominalna ugaona brzina pogonskog vratila elektromotora pumpe je 1450 o/min.

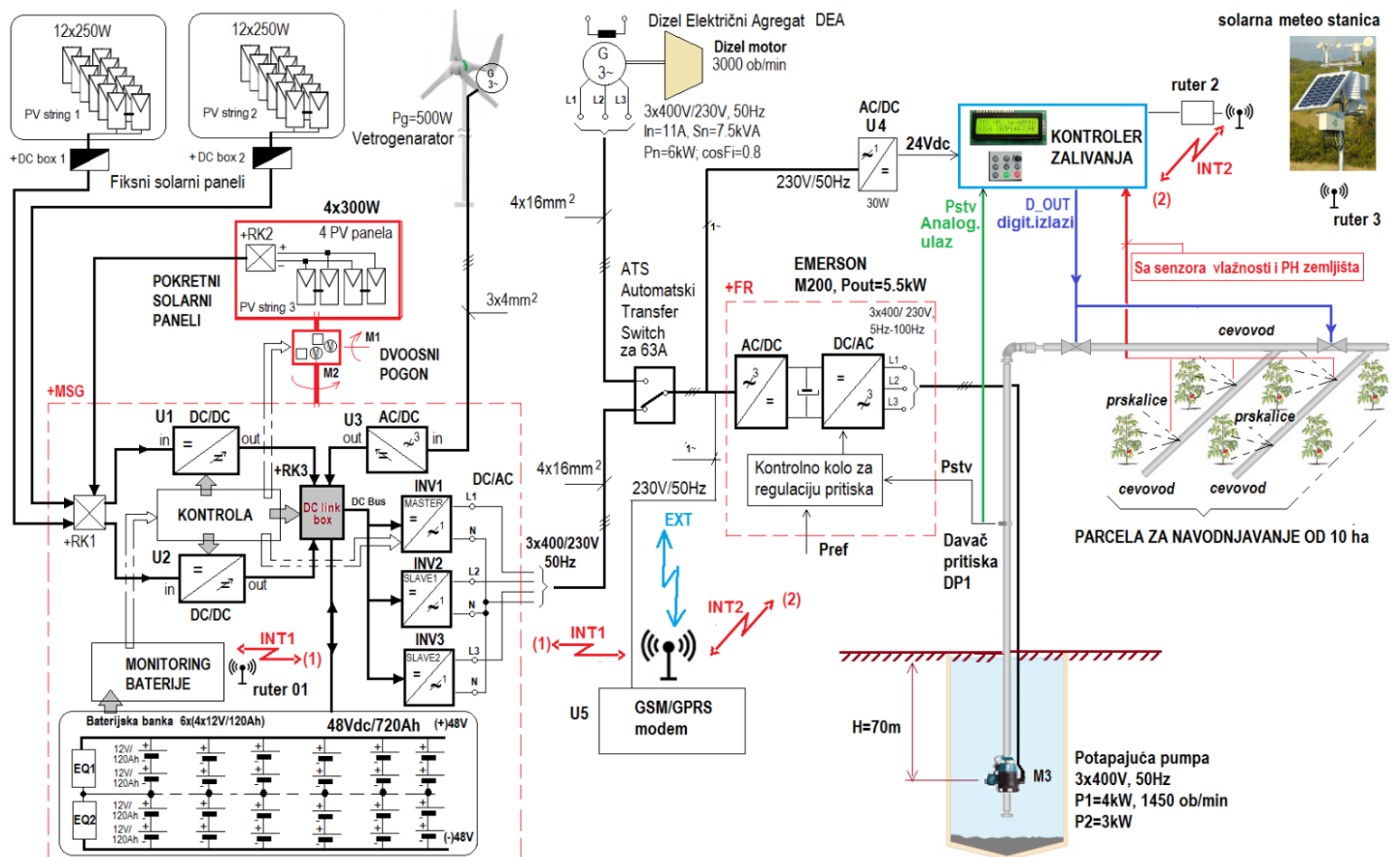
Shodno prethodnim zahtevima za pogonskim motorom pumpe za navodnjavanje projektovan je frekventni regulator (+FR) maksimalne izlazne snage 5.5 kW. Izabran je frekventni regulator serije M200, proizvodnje EMERSON[19]. Obzirom da je stepen iskorišćenja +FR pri nominalnoj radnoj snazi, $\eta_{fr}=90\%$, dobija se da je ukupna snaga potrošnje pumpnog sistema (snaga na ulazu +FR) $P_{ps}\approx 6$ kW. U sklopu frekventne regulacije pogonskog elektromotora pumpe je realizovano kontrolno kolo za regulaciju pritiska (implementiran je PI regulator pritiska) u cevovodu sa prskalicama kojim je obezbeđeno navodnjavanje zemljišta na datoj parceli. Kao povratna sprema po pritisku se koristi davač pritiska DP1, opsega 0-10 bar, proizvodnje WIKA. Zadavanje referentne vrednosti P_{ref} se ostvaruje na tastaturi frekventnog regulatora.

Sledeći potrošač u sistemu, ali značajno manje snage potrošnje (maksimalne snage 100 W), je kontroler zalivanja CMC-08-24 firme CEPEX [20] u okviru koga se na osnovu informacija sa senzora vlažnosti i PH zemljišta, pobuđuju odgovarajući digitalni izlazi D_OUT (u tri programska moda), koji obezbeđuju uključivanje odgovarajućih elektromagnetnih ventila u cevovodu za navodnjavanje, kao što prikazuje Slika 3. Kontroler podržava uključivanje standardno 8 elektromagnetnih ventila (uz proširenja i do 24 maksimalno). U okviru kontrolera zalivanja je obezbeđen i analogni ulaz sa davača pritiska DP1. Napajanje kontrolera zalivanja se ostvaruje AC/DC pretvaračem U4 (ispravljačem) ulaznog napona 230 V, 50 Hz i jednosmernog izlaznog napona 24 Vdc i struje ≈ 4 A, što za stepen iskorišćenja ovog modula od 90%, daje ulaznu snagu od oko 110 W.

U sistemu navodnjavanja je realizovan GSM/GPRS modem koji komunicira preko dva WIRELESS rutera (jedan se koristi uz kontroler baterijske banke, a drugi za kontroler zalivanja). Ovaj

modem preko svog eksternog linka šalje sve zahtevane statuse i podatke korisniku. Takođe korisnik može putem ovog linka uključiti ili isključiti pojedine potrošače. Potrošnja ovog modemskeg sistema ne prelazi 50 W. U sistemu je takođe

realizovan sistem video nadzora koji obezbeđuje zaštitu sistema od provale i krađe. Ovaj sistem se napaja iz 48 Vdc i njegova maksimalna snaga potrošnje iznosi oko 100 W.



Slika 3. Blok šema sistema napajanja iz OIE i kontrole „Smart Land“ postrojenja sa daljinskim nadzorom i upravljanjem poljoprivrednom proizvodnjom na otvorenoj poljoprivrednoj parceli.

Solarna meteorološka stanica se napaja preko sopstvenih solarnih panela snage 50 W i sopstvene baterije, tako da ne opterećuje hibridno napajanje sistema. U Tabeli 1 su date snage potrošnje svih potrošača električne energije na datoj parceli.

Tabela 1. Pregled potrošača električne energije na parceli

Potrošač	Snaga (W)
Pumpno postrojenje sa frekventnim regulatorom	5300
Kontroler zalivanja	110
Sistem video-nadzora	100
Wireless ruteri (3 kom.)	30
GSM/GPRS modem (2 kom.)	60
Kola pomoćne elektronike u „stand by“ režimu	100
SUMARNO	5700

IV HIBRIDNI SISTEM NAPAJANJA POTROŠAČA

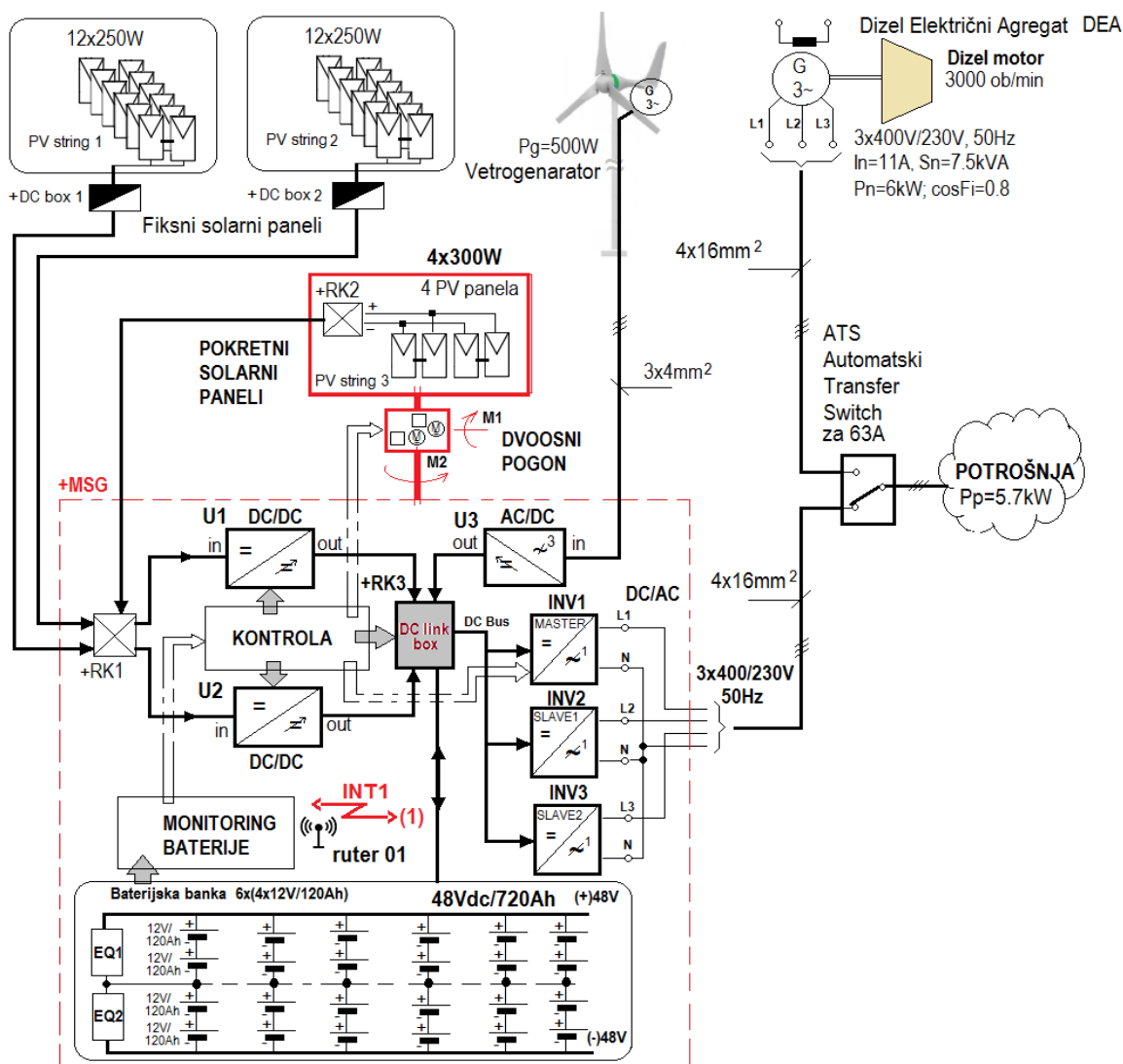
Hibridni sistem napajanja potrošača je prikazan na integralnoj funkcionalnoj blok šemi na Slici 3, dok je na Slici 4 prikazan

detaljnije sa svim ključnim elementima i blokovima energetske elektronike, odnosno energetskim pretvaračima.

Celokupna potrošnja u ovom sistemu se pretežno napaja iz OIE, odnosno solarnih panela i vetra. Kao što se sa Slike 4 vidi za dati sistem je projektovana je baterijska banka 48 Vdc/720 Ah (6 paralelnih grana i u svakoj grani 4 redno vezane baterije od 12 Vdc/120 Ah). Izabran je nominalni baterijski napon od 48Vdc (minimalno 40 Vdc.... maksimalno 55.6 Vdc) kako bi se postigao kompromis u pogledu struja kablovskog razvoda, zagrevanja kablova, gubitaka snage u instalaciji. Svaka baterijska grana je obezbeđena sa modulima za izjednačenje napona i struja EQ1i, EQ2i (i=1...6), na rednim vezama od dve baterije i koji su za nominalni napon 24Vdc (videti Sliku 4). Na ovaj način se u znatnoj meri produžava radni vek baterijske banke. Baterijska banka je vezana u energetsko čvorište tzv. „DC link box“ koje predstavlja centralni energetski DC sabirni orman na koji su povezani solarni MPPT punjači U1 i U2, punjač vetrogeneratorskog (VG) U3 i DC energetski ulazi DC/AC pretvarača invertora INV1, INV2 i INV3.

Raspoloživa energija iz baterijske banke 720 Ah pri nominalnom naponu 48 Vdc je $720 \text{ Ah} \times 48 \text{ V} = 34,56 \text{ kWh}$. Za dubinu pražnjenja baterijske banke od 50%, autonomija sistema za navodnjavanje (frekventni regulator, elektromotor pumpe) je $(34,56 \text{ kWh}/2)/5,3 \text{ kW} = 3,2 \text{ h}$. Za dubinu pražnjenja baterijske

banke od 80% (u ovom režimu je značajno manji vek trajanja baterija, odnosno manji broj ciklusa punjenje-pražnjenje u odnosu na slučaj kada je dubina pražnjenja 50%) autonomija rada pumpnog sistema je oko 5 h.



Slika 4. Blok šema hibridnog sistema napajanja potrošača na postrojenja za navodnjavanje na parceli „Belegiš“

Pomenuti slučajevi se odnose na režim rada kada nema sunčeve energije, odnosno kada opterećenje direktno prazni bateriju. U realnim uslovima potrošnja električne energije će biti podržana i iz solarnih panela koji su raspoređeni u tri grupe, kao što pokazuje Slika 4. Sistem čine dva stringa fiksnih solarnih panela montiranih na odgovarajućim nosačima, odnosno pod konstrukcijom na zemlji (PV string-1 i PV string-2) od po 12 panela, svaki snage od 250 W i grupa od 4 solarna panela, svaki snage od 350 W koji su montirani na sistemu za dvo-osno praćenje sunca mobilne solarne jedinice MSG [11]. Tako je ukupna instalisana snaga u solarnim panelima $2 \times 12 \times 250 \text{ W} + 4 \times 350 \text{ W} = 7,4 \text{ kW}$. Ako se uzme u obzir i vetroturbina sa pripadajućim električnim generatorom snage $P_g = 500 \text{ W}$, dobija se da je ukupni prinos iz OIE približno 8 kW aktivne snage. U realnom slučaju rad pumpnog postrojenja se ostvaruje pri aktivnoj snazi od oko 4 kW, tako da će se približno

polovina proizvedene električne energije iz OIE koristiti za punjenje baterijske banke, a druga polovina za napajanje pumpnog agregata. Na ovaj način je postignut balans između proizvedene i korišćene energije u pomenutom hibridnom sistemu napajanja za navodnjavanje useva.

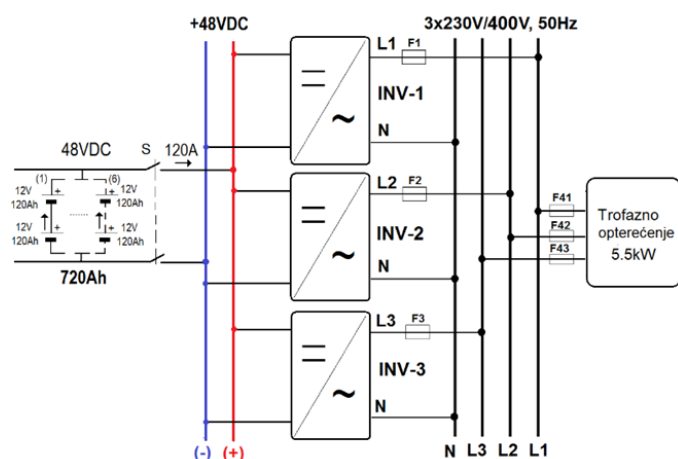
U okviru predstavljenog hibridnog sistema napajanja posebno mesto zauzima deo sa modulima energetske elektronike, odnosno sistem energetske pretvarača. Ovaj sistem sa centralnom kontrolnom jedinicom koji smešten na mobilnoj jedinici MSG ima zadatak da obezbedi kontrolisano punjenje i pražnjenje baterijske banke, kako iz solarnih panela, tako i iz VG, ali takođe ima ulogu da obezbedi sinhronizaciju i rad izlaznih invertora INV1, INV2, i INV3 u trofaznoj sprezi „zvezda“ [21].

Stabilizacija napona i struje iz solarnih panela i punjenje baterijske banke je ostvareno DC/DC pretvaračima (punjačima)

U1 i U2, koji u sebi imaju implementirane algoritme praćenja tačke maksimalne snage solarnih panela ("Maximum Power Point Tracking"-MPPT). Ovim uređajima je obezbeđeno kontrolisano i optimalno punjenje baterijske banke. Svi pretvarački uređaji poseduju sve potrebne električne zaštite (naponske i strujne) i obezbeđuje maksimalno iskorišćenje nelinearne krive raspoložive snage solarnog panela [22-24].

Linijski napon koji obezbeđuje VG je efektivne vrednosti od oko 35 Vac pri brzini vetra od oko 10 m/s, dok je pri brzini vetra od 9 m/s ovaj napon efektivne vrednosti od oko 28 Vac. Pri ovim uslovima struja po fazi je oko 10 A. Stabilizacija napona VG je obezbeđena posebnim MPPT punjačem U3 koji je predviđen za paralelan rad sa solarnim MPPT kontrolerima (punjačima) U1 i U2. Ulazni trofazni napon VG se pretvara u jednosmerni napon posredstvom ulaznog ispravljača, a ovaj ispravljeni napon se zatim dodatno stabilizuje i prilagođava baterijskom naponu. Izlazna struja koju obezbeđuje ovaj modul je oko 20A pri maksimalnoj brzini vetra, tako da je ukupna struja punjenja baterije koja se dovodi u „DC link“ razvod oko 140 A, uzimajući u obzir i solarne panele (svaka grupa PV panela obezbeđuje struju od oko 60 A; dve rupe 2x60 A). Dakle struja od oko 140 A se ima u DC među kolu, pri maksimalnim ulaznim snagama iz obnovljivih izvora energije (vetra i sunca). VGS MPPT modul ima implementiranu dodatnu funkciju mehaničkog kočenja VG (aktiviranje mehaničke kočnice) u uslovima jakih (olujnih vetrova) kada se imaju brzine vetra veće od 10 m/s. U konkretnom slučaju je mehaničko kočenje VGS sklopa obezbeđeno pri brzini vetra od 10 m/s.

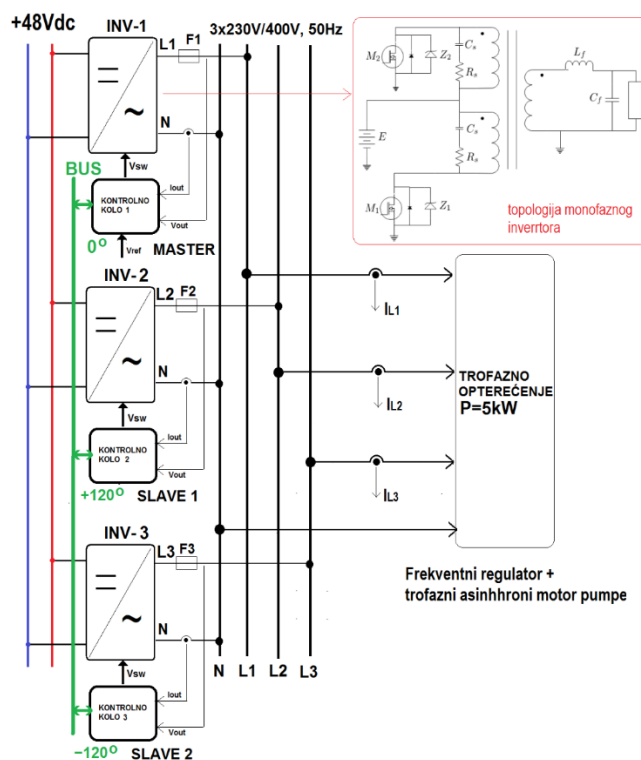
Tropolna šema povezivanja invertora je data na Slici 5. Osnovu ovog sistema čine monofazni invertori INV1-INV3, svaki snage 2.2kW, koji su sa DC strane spregnuti paralelno, dok su im AC izlazi spregnuti u trofaznoj sprezi – "zvezda", sa izvedenim nultim provodnikom. Ovim sistemom je moguće napajati trofazne otporne i (ili) induktivne potrošače u spregama „zvezda“ i „trougao“, monofazne potrošače, kao i nesimetričnu potrošnju.



Slika 5. Šema povezivanja monofaznih invertora u trofaznu spregu

Kod nesimetričnih potrošača (čak i sa potpunom asimetrijom faznih napona) je moguće ostvariti pouzdanu isporuku električne energije i obezbediti pouzdanu njihovo napajanje. Izlazni trofazni napon koji se dobija ovom konfiguracijom je 230V/400V, 50 Hz,

pri čemu je moguće obezbediti maksimalnu izlaznu struju od 12 A po fazi. Izlaz je i u ovom slučaju sposoban da podrži kratkotrajno preopterećenje od 30 A po fazi u vremenskom intervalu od 4 s. Na ovaj način je moguće obezbediti pouzdan start trofazne pumpe snage do 5,5 kW. Da bi invertorski sistem bio u potpunosti funkcionalan potrebno je pored energetskog sprezanja obezbediti i sinhronizaciju invertora. Principijska blok šema sinhronizacije upravljačkih modula invertora u sklopu hibridnog sistema napajanja je data na Slici 6, na kojoj je dat način povezivanja i sinhronizacije invertora za slučaj trofazne sprege na izlazu.



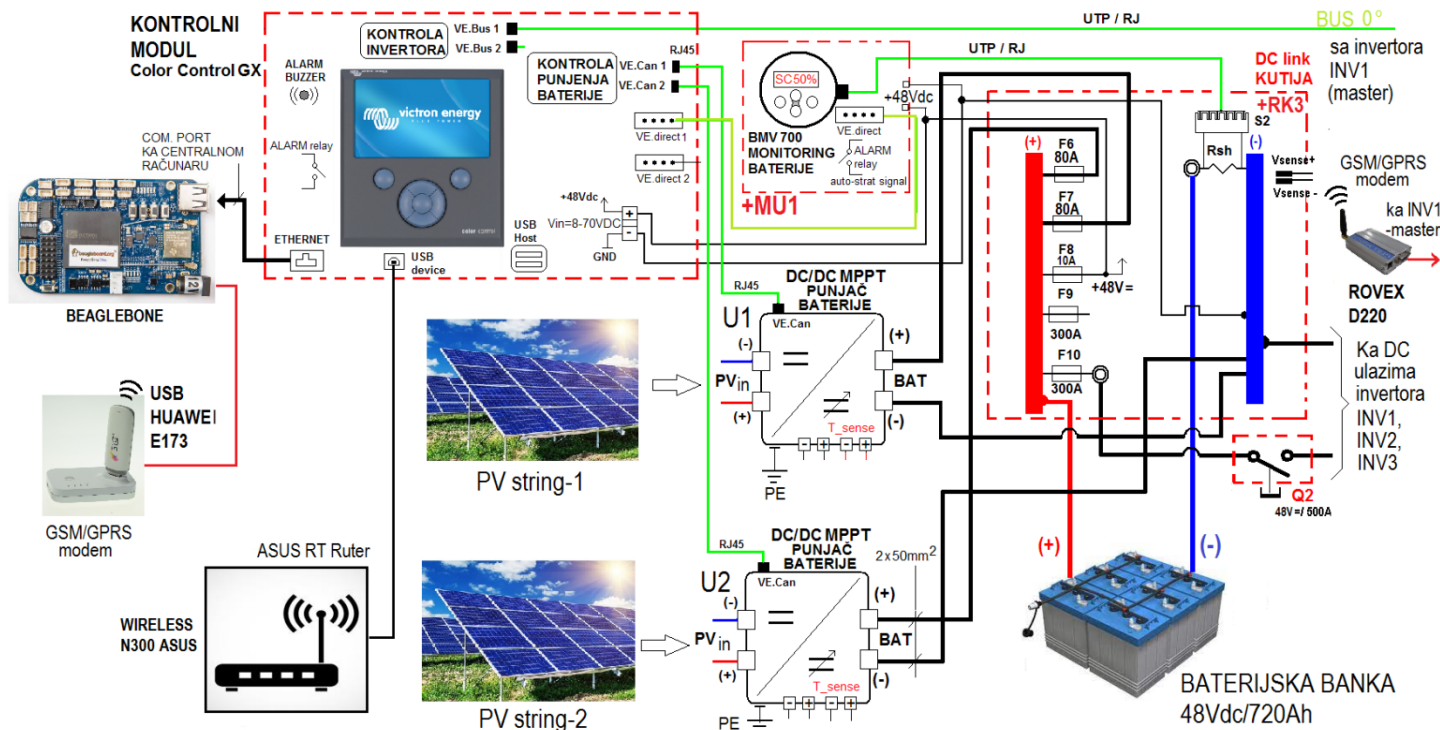
Slika 6. Sinhronizacija i povezivanje upravljačkih kola invertora u trofaznoj sprezi

Kontrolno kolo svakog od invertora je realizovano sa dve povratne sprege, jedna po izlaznom naponu i druga po izlaznoj struji [25-27]. Signali povratne sprege po izlaznom naponu (označen sa V_{out}) i po izlaznoj struji (označen sa I_{out}) se dovode na analogne ulaze kontrolnog kola.

Referentni signal napona V_{ref} se takođe dovodi na ulaz kontrolnog kola i on određuje željenu vrednost napona na opterećenju. Izlazi iz kontrolnog kola V_{sw} su u stvari digitalni (prekidački) i služe za upravljanje pobudnim kolima MOSFET prekidača koji se nalaze u sklopu topologije invertora. Inače je topologija invertora realizovana sa dve grupe MOSFET prekidača i sa transformatorom sa srednjom tačkom (dva primara i jedan sekundar). Na sekundaru je korišćen LC filter u „T sprezi“, za filtraciju PWM napona na sekundaru transformatora i dobijanje sinusnog napona na izlazu. U kontroli je primenjena sinusna PWM naponska modulacija sa trougaonim nosiocem 50% (trajanje usponske ivice jednako trajanju silazne ivice), učestanosti 50 kHz.

Pored opisanih ulaza i izlaza svako od upravljačkih kola invertora ima komunikacioni port preko koga su povezani na zajednički komunikacioni BUS interfejs. Komunikacioni BUS je izveden kao *Can BUS*, pri čemu je ustanovljen i preciziran protokol po kojem „komuniciraju“ invertori. Pri ovome je veoma bitno da jedan od invertora bude MASTER, dok su ostala dva

SLAVE1 i SLAVE 2. Podešavanje svih funkcija i dodeljivanje uloga invertorima je moguće ostvariti softverski preko odgovarajuće softverske aplikacije. Opciono uloge invertora se mogu dodeljivati i hardverski podešavanjem odgovarajuće kombinacije DIP prekidača koji se nalaze u sklopu svakog od kontrolnih kola invertora.



Slika 7. Blok šema upravljačkog dela sistema hibridnog napajanja „Smart Land“ postrojenja

U trofaznoj sprezi koja je prikazana na Slici 6 se ostvaruje sinhronizacija invertora na takav način da su fazni pomeraji referentnih signala za upravljačka kola invertora SLAVE1 i SLAVE2 jednaka $\theta + 120^\circ$ i $\theta - 120^\circ$ respektivno, gde je θ fazni pomeraj MASTER upravljačkog kola. Uobičajeno je da se usvaja da je fazni pomeraj MASTER invertora $\theta = 0^\circ$.

Kao rezervni izvor trofaznog napajanja je izveden dizel električni agregat (DEA), koji je pogonjen dizel motorom maksimalne snage od oko 8 kW pri brzini obrtanja od oko 3000 ob/min. Električni generator u sklopu DEA je trofazni sinhroni generator sa nezavisnom pobudom na rotoru napona $3 \times 400\text{V}/230\text{V}$, 50Hz, nominalne struje $I_n = 11\text{ A}$, nominalne prividne snage $S_n = 7.5\text{ kVA}$, nominalne aktivne snage $P_n = 6\text{ kW}$ i nominalnog faktora snage $\cos\phi = 0.8$. DEA se koristi isključivo u režimu kada je snaga iz OIE značajno redukovana (u slučaju kada nema vetra i sunčeve insolacije) i kada je baterijska banka ispražnjena ispod dubine pražnjenja od 80%.

U slučaju potpunog pražnjenja baterijske banke i redukovane snage iz obnovljivih izvora predviđeno je automatsko uključanje trofaznog napajanja iz DEA putem automatske statičke sklopke (tzv. "Automatic Trasfer Switch"-ATS), koji je prikazan na električnoj principskoj šemi na Slici 4, tako da je obezbeđeno neprekidno snabdevanje sistema potrošača, odnosno sistema za navodnjavanje.

V MERNO-UPRAVLJAČKI DEO SISTEMA

Merno upravljački deo sistema je prikazan na principskoj blok šemi na Slici 7. Kontrolni modul kojim se vrši kontrola punjenja baterijske banke, kontrola rada invertora kao i akvizicija svih potrebnih merenja u sistemu hibridnog napajanja, je baziran na modulu *Color Control GX* (CCGX) proizvodnje VICTRON. Preko ETHERNET porta ovaj modul je povezan sa centralnim računarom koji kontroliše rad celokupnog postrojenja. Ovaj računar je baziran na BEAGLEBONE BLACK procesoru. Ovaj modul ima mogućnost prijema i slanja podataka daljinski putem GSM/GPRS modula putem koga je moguće pratiti sve relevantne parametre sistema, a takođe je moguće daljinski uključiti ili isključiti pojedine funkcionalne blokove.

U okviru baterijske banke je realizovan specijalan merni digitalni elektronski sklop napona i struje baterijske banke (tzv. „baterijski monitor“), baziran na modulu BMV702 proizvodnje VICTRON, na blok šemi na Slici 7 označen sa +MU1.

Napajanje ovog modula je ostvareno sa baterijske banke 48Vdc. Opseg DC napajanja ovog modula je 8-70 Vdc. Ovaj kontrolni modul ima nekoliko komunikacionih portova: VE-direct1 (preko njega je povezan baterijski monitor BMV702), VE-direct2 (u ovoj aplikaciji se ne koristi), VE-Bus1 (preko njega se ostvaruje komunikacija sa invertorskom grupom, tačnije sa MASTER

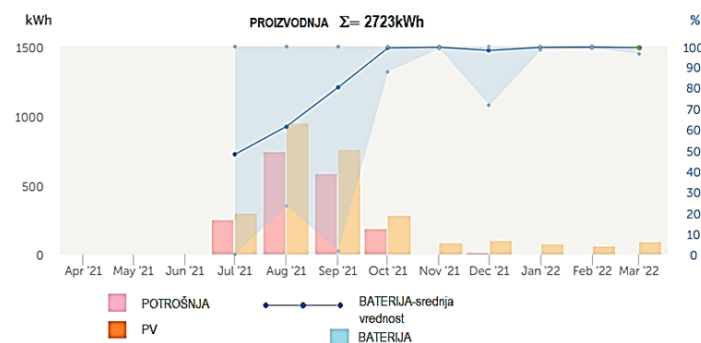
invertorom INV-1), VE-Can1 (za komunikaciju sa MPPT punjačem U1), VE-Can2 (za komunikaciju sa MPPT punjačem U2). Modul CCGX ima nekoliko portova za povezivanje sa ruterom

U mernom kolu baterijske banke se koristi energetski merni strujni šant Rsh (merni otpornik u DC sabirnoj priključnoj kutiji), osetljivosti 1mV/1A, za strujni opseg 0-500A, kojim je obezbeđen monitoring i kontrola stanja baterijske banke. Napon napajanja na DC sabirnicama, kao i signal struje šanta Rsh se direktno vode na modul BMV702 preko UTP /RJ kabla. Ovaj modul je povezan sa kontrolnim modulom CCGX preko porta VE-direct1. Na LCD displeju „baterijskog monitora“ BMV702 je moguće selektivno očitavati sledeće relevantne veličine: struju punjenja/pražnjenja baterije izraženu u [A], napon baterije u [V], trenutnu raspoloživu i procenjenju energiju baterije do krajnje dubine pražnjenja, izražene u [kWh], dubinu ispražnjenosti baterija izražene u [%], kao i stanje napunjenosti baterijske banke izražene u [%]. Statusi svih ovih veličina se šalju putem komunikacionog porta VE-direct na modul CCGX, a sa njega putem ETHERNET konekcije na centralni računar. Centralni računar komunicira se korisnikom putem pripadajućeg GSM/GPRS modema.

VI EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U ovom poglavlju su predstavljeni neki ključni eksperimentalni rezultati koji se odnose na bilanse proizvedene električne energije na godišnjem, mesečnom i dnevnom nivou za karakteristični mesec sa najvećom proizvodnjom (avgust 2021). Eksperimentalni rezultati su dobijeni na osnovu logovanja podataka koje je ostvareno u modulu merno upravljačkom modulu CCGX. Merenja su vršena u periodu od 1.07.2021 (kada su hibridni sistem napajanja i pripadajući akvizicioni sistem kompletno implementiran i pušten u rad) do 30.03.2022.

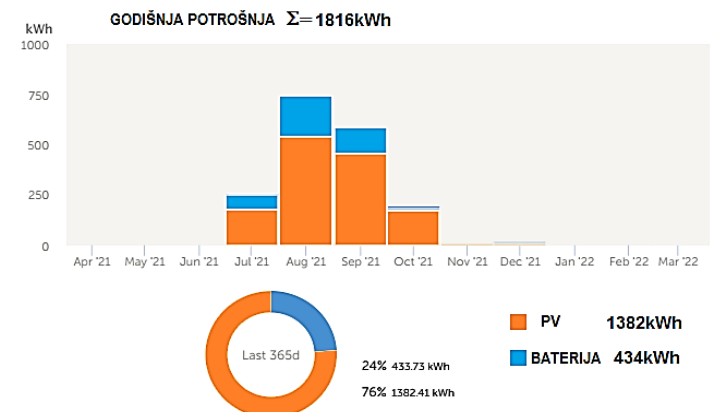
Na Slici 8 su dati dijagrami proizvodnje električne energije iz PV panela, potrošnje električne energije i deo koji je akumuliran u baterijskoj banci (trenutne i srednje vrednosti). Najveća proizvodnja električne energije od oko 920 kWh iz PV panela je ostvarena u avgustu mesecu.



Slika 8. Dijagrami proizvodnje i potrošnje električne energije na poljoprivrednoj parceli *Smart Land* „Belegiš“ za period jul 2021-mart 2022.

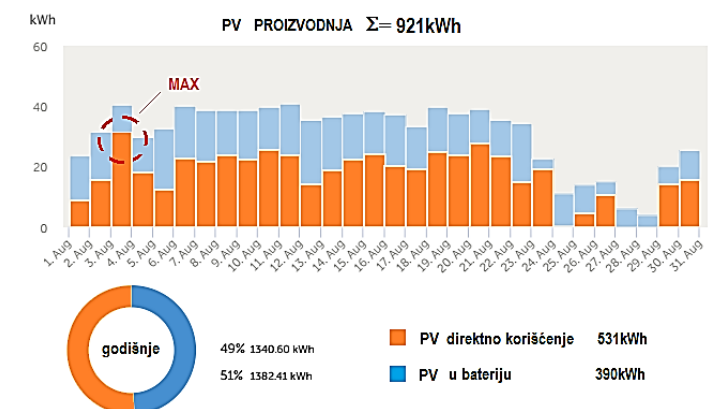
U julu mesecu koji je bio vremenski nestabilan i sa dosta kišnih dana je ostvarena proizvodnja od oko 200 kWh, dok je u septembru mesecu koji je bio sa dosta sunčanih dana je ostvarena

relativno velika proizvodnja od oko 700 kWh i u oktobru oko 200 kWh. U ostalim mesecima su ostvarene značajno manje vrednosti proizvodnje po mesecima (period novembar 2021 – mart 2022). Sumarno gledano ukupna proizvodnja električne energije na datoj lokaciji i u datom periodu je iznosila oko 2723 kWh. Ukupna potrošnja za dati period je iznosila 1816 kWh, od toga iz PV panela 1382 kWh i 434 kWh za punjenje baterijske banke 48Vdc/720Ah, što u procentualnom iznosu daje 76% za energiju potrošenu iz sunca i 24% potrošene energije za punjenje baterijske banke (videti detaljni prikaz dijagrama na Slici 9). Kao što prikazuju rezultati merenja na Slici 8, u periodu od novembra 2021 - marta 2022 nije bilo potrošnje obzirom da navodnjavanje počinje od kraja maja, tako da je u ovom periodu akumulirana energija u baterijskoj banci oko 1500 kWh.



Slika 9. Detaljni dijagram potrošnje električne energije (iz PV panela i baterijske banke) na poljoprivrednoj parceli *Smart Land* „Belegiš“ za period jul 2021-mart 2022.

Kao što se iz prethodno prikazanih dijagrama može uočiti, najveća proizvodnja električne energije je ostvarena u avgustu mesecu i ona je iznosila sumarno 921 kWh. Dijagram ukupne mesečne proizvodnje za mesec avgust 2021. je dat na Slici 10. Sa dijagrama na Slici 10 se dobija da je iz PV panela direktno iskorišćeno 531 kWh, dok je iz PV panela u baterijskoj banci akumulirano 390 kWh.

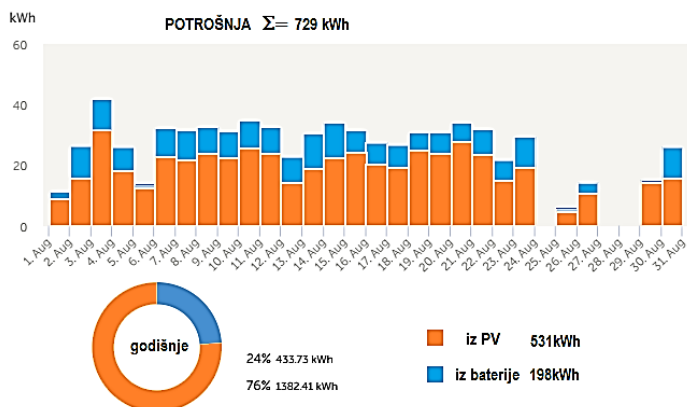


Slika 10. Dijagram srednje mesečne proizvodnje električne energije za mesec avgust 2021 na poljoprivrednoj parceli *Smart Land* „Belegiš“

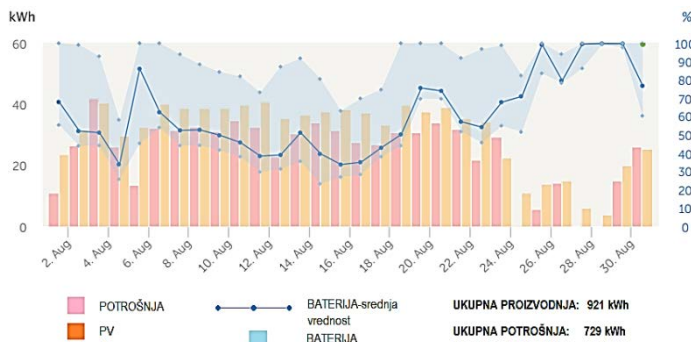
Sa dijagrama proizvodnje električne energije sa Slike 10 se uočava da je najveća proizvodnja od 41 kWh ostvarena 4. avgusta 2021.

Na Slici 11 su dati dijagrami potrošnje za mesec avgust 2021. U ovom mesecu je ostvarena ukupna potrošnja od 729 kWh, od toga iz PV panela 531 kWh, a iz baterijske banke 198 kWh.

Na Slici 12 su dati integralno dijagrami proizvodnje i potrošnje električne energije, kao i energetske potencijal baterijske banke, na poljoprivrednoj parceli *Smart Land „Belegiš“* za avgust 2021.



Slika 11. Dijagram srednje mesečne potrošnje električne energije (iz PV panela i baterijske banke) na poljoprivrednoj parceli *Smart Land „Belegiš“* za mesec avgust 2021.



Slika 12. Integralni dijagrami srednje mesečne proizvodnje i potrošnje električne energije na poljoprivrednoj parceli *Smart Land „Belegiš“* za mesec avgust 2021.

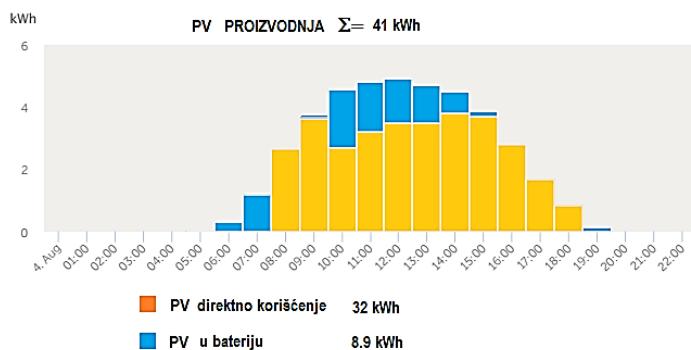
Na Slikama 13-15 su prikazani karakteristični dijagrami dnevne proizvodnje, dnevne potrošnje i integralni dijagram dnevne potrošnje za 4. avgust 2021 (u ovom danu se imala apsolutno maksimalna proizvodnja na mesečnom i na godišnjem nivou).

Na Slici 13 su prikazani dijagrami dnevne proizvodnje električne energije za 4. avgust 2021. Ukupna proizvodnja je iznosila 41 kWh, od toga je iz sunca direktno iskorišćeno 32 kWh, dok je u baterijskoj banci akumulirano 8,9 kWh.

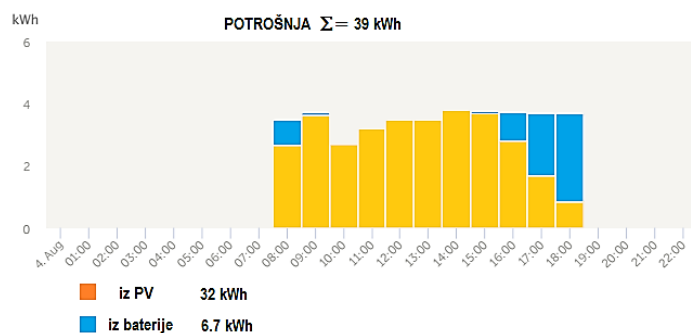
Na Slici 14 su za isti dan prikazani dijagrami dnevne potrošnje. Ukupna potrošnja je iznosila 39 kWh, od toga iz solarnih panela 32 kWh i iz baterijske banke 6,7 kWh.

Na Slici 15 su prikazani integralno dnevni dijagrami proizvodnje

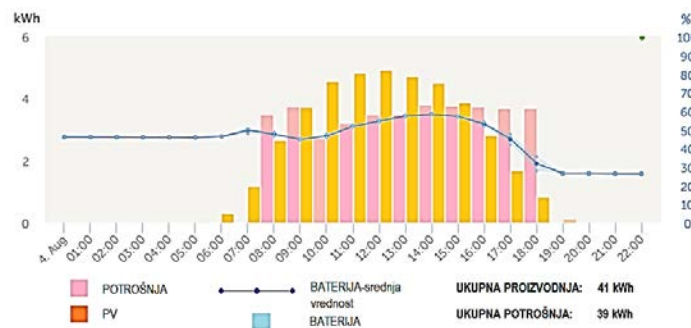
i potrošnje električne energije, kao i energije akumulirane u baterijskoj banci za 4. avgust 2021.



Slika 13. Dijagrami dnevne proizvodnje električne energije na poljoprivrednoj parceli *Smart Land „Belegiš“* na dan 4. avgust 2021.



Slika 14. Dijagrami dnevne potrošnje električne energije na poljoprivrednoj parceli *Smart Land „Belegiš“* na dan 4. avgust 2021.



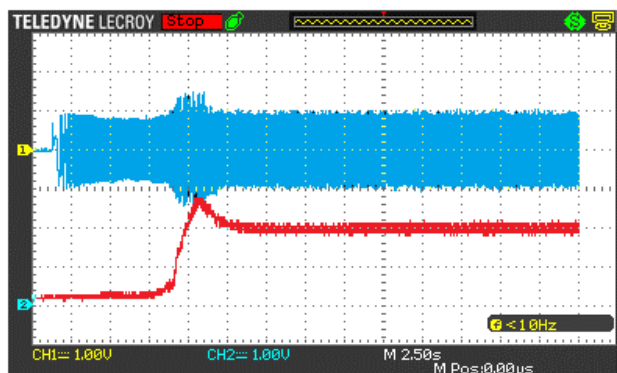
Slika 15. Integralni dijagrami dnevne proizvodnje i potrošnje električne energije, kao i akumulirane energije baterijske banke na poljoprivrednoj parceli *Smart Land „Belegiš“* na dan 4. avgust 2021.

Na Slici 16 su dati osciloskopski snimci fazne struje motora pumpe (opterećenje je simetrično pa se može smatrati da su vrednosti struja u ostale dve faze iste efektivne vrednosti) i pritiska u instalaciji cevovoda prskalica u sistemu navodnjavanja. Zadana vrednost pritiska u instalaciji je bila podešena na vrednost Pref=8 bar.

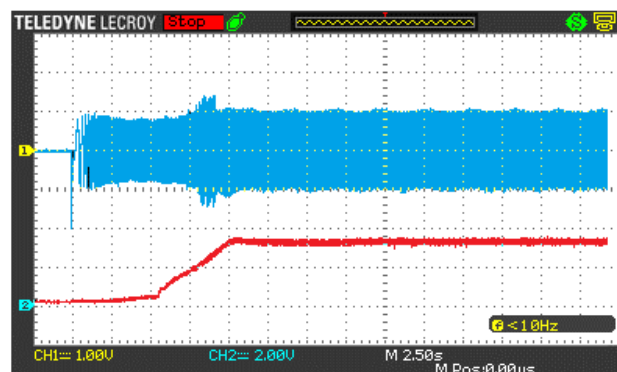
Regulacioni sistem pritiska je tako koncipiran da se na relativno jednostavan način može zadavati tip regulacije (P, PI, PID), kao i odgovarajuća pojačanja.

Na Slici 16(a) su prikazani talasni oblici za slučaj implementiranog P regulatora pritiska. Zadana vrednost pritiska postiže za znatno kraće vreme ali sa određenim premašajem od 50%. U ovom slučaju se takođe uočava da je stvarana vrednost pritiska oko 9 bara i da ona odstupa od zadate vrednosti od 8 bara, što je posledica činjenice da je u sklopu regulatora pritiska bio implementiran P sistem regulacije.

Na Slici 16(b) su prikazani dati talasni oblici za slučaj implementiranog PI regulatora uz odgovarajuće podešavanje parametara. U ovom slučaju se zadana vrednost pritiska sa zadovoljavajućom tačnošću postiže postepeno u intervalu od oko 5s, bez premašaja pritiska u instalaciji.



(a)



(b)

Slika 16. Osciloskopski snimci fazne struje invertora INV1 (master) i pritiska u instalaciji prskalica u sistemu navodnjavanja; (a) P regulator pritiska, (b) PI regulator pritiska; CH1- fazna struja invertora INV-1 (master), 5A/div, CH2-signal sa davača pritiska, 5 bar/div; vremenska baza 2.5s/div

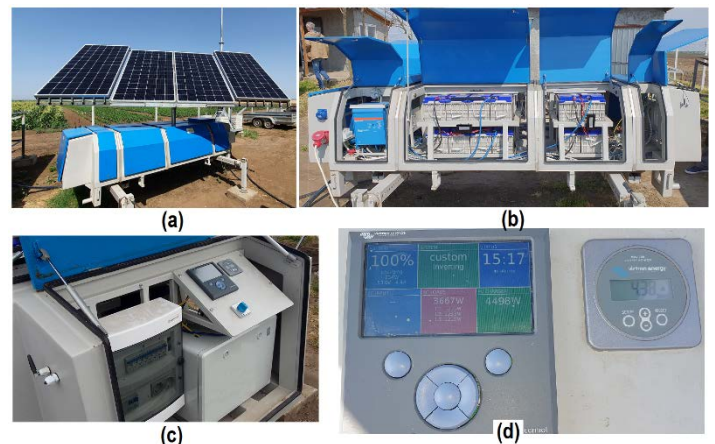
VII REALIZACIJA POJEDINIHL DELOVA SISTEMA HIBRIDNOG NAPAANJA

Na Slici 17 je prikazan realizovani sistem hibridnog napajanja potrošača, odnosno pumpnog zalivnog sistema na poljoprivrednoj parceli *Smart Land- Belegiš*, sa prikazom osnovnih funkcionalnih celina.

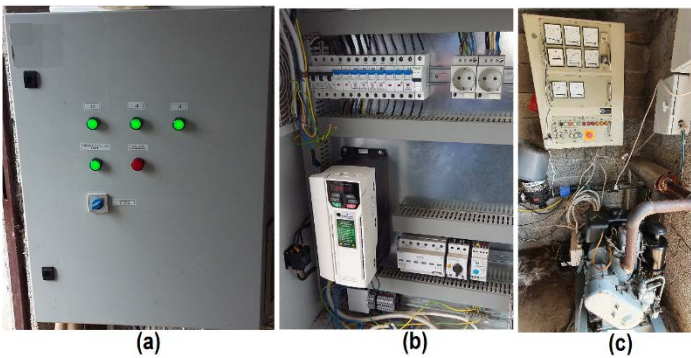


Slika 17. Realizacija hibridnog sistema napajanja banke na poljoprivrednoj parceli *Smart Land - „Belegiš“* sa pojedinim funkcionalnim celinama: (1) baterijska banka, uređaji energetske elektronike i merno-regulacioni deo, (2) prostorija za smeštaj razvodnog ormara pumpnog agregata sa frekventnim regulatorom i razvodnog ormara DEA, (3) sistem solarnih panela 12x250W i 4x350W, (4) montažni stub sa VG snage 500W, (5) meteorološka stanica

Na ovom prikazu se uočavaju osnovne funkcionalne celine: (1) baterijska banka, uređaji energetske elektronike i merno-upravljački deo (detaljan prikaz na Slici 18); (2) prostorija za smeštaj razvodnog ormara pumpnog agregata sa frekventnim regulatorom i razvodnog ormara DEA (detaljni prikaz na Slici 19), (3) sistem solarnih panela (detaljni prikaz na Slici 20), (4) montažni stub vetroturbine sa VG (detaljni prikaz na slici 21) i (5) meteorološka stanica.



Slika 18. Baterijska banka i prateći uređaji; (a) izgled uređaja MSG sa 4 solarna panela ukupne snage 4x350W, (b) izgled baterijske banke sa pratećim uređajima energetske elektronike (DC7DC, DC/AC), (c) izgled merno upravljačkog pulta sa ugrađenim kontrolerom CCGX i baterijskim monitorom BMV702, (d) eksploatacioni prikaz parametara u radnom režimu hibridnog napajanja



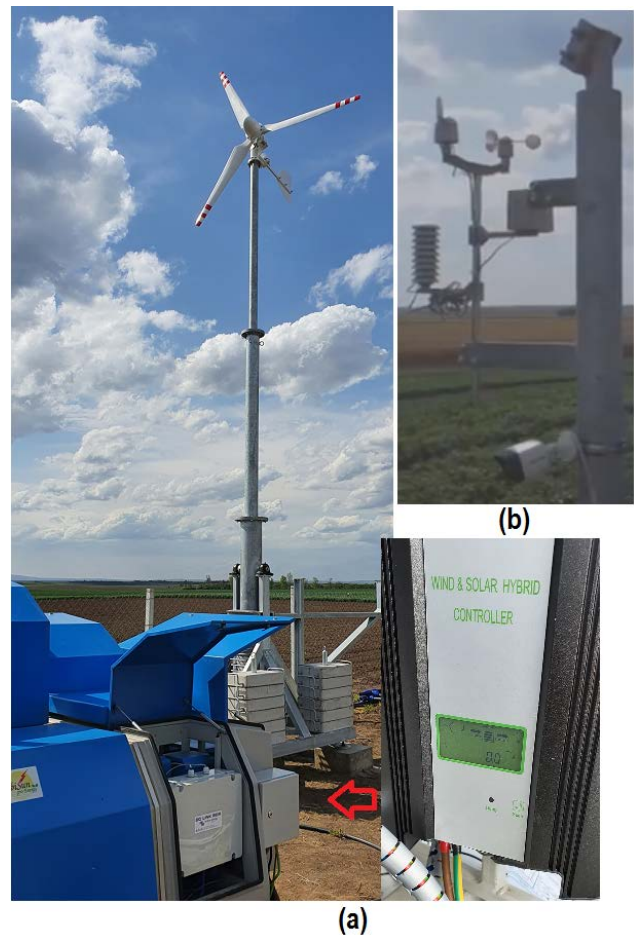
Slika 19. Prikaz energetske opreme u prostoriji za smeštaj pogona pumpnog agregata i DEA; (a) vrata RO pumpnog agregata sa komandnom i signalizacionom opremom, (b) unutrašnji izgled RO pumpnog agregata i pozicija frekventnog regulatora FR izlazne snage 5.5kW, (c) dispozicija DEA i pratećeg razvodnog ormara



Slika 20. Dispozicija sistema solarnih panela (ukupne snage $2 \times 12 \times 250 \text{ W} = 6 \text{ kW}$) i montažnog stuba vetroturbine.

Na Slici 20 je prikazana dispozicija fiksnih solarnih panela raspoređenih u dve grupe od po 12 solarnih panela. Svaki solarni panel je snage 250W, tako da je ukupna snaga ovog dela solarnog sistema 6kW. Na Slici 18(a) je prikazan deo solarnih panela (4 kom.) koji se nalazi na uređaju MSG. U ovom slučaju je snaga svakog od solarnih panela 350W, tako da je ukupna snaga solarnih panela na MSG uređaju 1.5kW. Na osnovu ovoga je ukupna snaga solarnih panela na *Smart Land* postrojenju 7.5kW, što u potpunosti zadovoljava celokupnu potrošnju.

Na Slici 21 je prikazana dispozicija realizovanog VGS sistema uključujući i preklopivi montažni stub po tzv. sistemu „đeram“ [16], MPPT punjač u okviru baterijske banke, kao i digitalnu meteorološku stanicu napajanu iz sopstvenog solarnog panela snage 50W.



Slika 21. Dispozicija VGS postrojenja; (a) izgled preklopivog montažnog stuba i pozicija montaže MPPT kontrolera VG u sklopu baterijske banke, (b) meteorološka stanica na sopstvenom stubu

VIII ZAKLJUČAK

U radu je prikazana realizacija jednog tipa hibridnog sistema napajanja koji obezbeđuje autonomno i neprekidno napajanje potrošača u sistemu navodnjavanja povrtarskih kultura na poljoprivrednoj parceli *Smart Land* u selu Belegiš. U radu je prikazana osnovna koncepcija sistema hibridnog napajanja, dati neki ključni eksperimentalni rezultati i aktivnosti u realizaciji projekta. Prikazani rad je jedan od rezultata realizacije projekta "Pametno upravljanje poljoprivrednim zemljištem i prirodnim resursima korišćenjem savremenih tehnologija" koji je realizovan u Institutu „Mihajlo Pupin“. Projekat je bio podržan od strane Razvojne agencije Ujedinjenih Nacija (UN) i Ministarstva zaštite životne sredine Republike Srbije. Pored Instituta „Mihajlo Pupin“, na projektu je učestvovao i Institut za ekonomiku poljoprivrede - IEP, Beograd, čiji su saradnici dali značajan doprinos u proceni ekonomske održivosti i detaljnoj izradi tehnoekonomske analize celokupnog projekta.

Pored opisanog sistema hibridnog napajanja u okviru projekta je realizovan sistem za daljinsko upravljanje navodnjavanjem i pametnim upravljanjem zemljištem i prirodnim resursima. Takođe, projektom su bili obuhvaćeni i realizacija sistema zaštite od atmosferskih pražnjenja (prihvatni sistem je realizovan sa

hvataljkom tipa „rani start“), realizacija sistema zaštitnog uzemljenja, kao i realizacija kompletnog sistema video nadzora na datoj parceli u cilju obezbeđenja od provale i krađe. Na ovaj način je postignuta potpuna samoodrživost sistema navodnjavanja na jednoj konkretno realizovanoj *Smart Land* poljoprivrednoj parceli.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje i tehnička realizacija opisanog sistema napajanja u ovom radu je finansijski podržano od Ministarstva zaštite životne sredine Republike Srbije (period 2019.-2021.) i Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (period 2020.-2021.)

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Sayed Y. A., Fadl M.E. Agricultural Sustainability Evaluation of the New Reclaimed Soils at Dairut Area, Assiut, Egypt using GIS Modeling, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 24, pp. 707–719, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.08.002>
- [2] Rikalović, G., Vračarević, B. Energetska politika kao faktor održivog razvoja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 3, pp. 66-72, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.66R>
- [3] Daly, H.E. *Ecological economics and sustainable development, Selected Essays of Herman Daly*, Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2007.
- [4] Rodić, A., Despotović, Ž.V., Stevanović, I. Pametna poljoprivreda- Mogućnosti digitalizacije i automatizacije u ekološki i ekonomski održivoj poljoprivrednoj proizvodnji, u monografiji : S.Roljević (Ed.), *Primena novih tehnologija u cilju pametnog upravljanja procesom gajenja povrća u zaštićenom prostoru*, Pogl. 2, (str. 27-58), Institut za ekonomiku poljoprivrede, Beograd, 2021.
- [5] Subić, J., Kljajić, N., Jeločnik, M. *Obnovljivi izvori energije i navodnjavanje u funkciji održivog razvoja poljoprivrede: ekonomski aspekti*, Institut za ekonomiku poljoprivrede, Beograd, 2017.
- [6] Jeločnik, M., Subić, J., Nastić, L. *Upravljanje troškovima na poljoprivrednim gazdinstvima*, Institut za ekonomiku u poljoprivrede, Beograd, 2021.
- [7] Geoghegan, T., Anderson, S., Dixon, B. *Opportunities to achieve poverty reduction and climate change benefits through low-carbon energy access programmes*, The Ashden Awards for sustainable energy, GVEP International & IIED. (available at 2008)
- [8] *International Energy Agency (IEA). World energy outlook*, Paris, 2011.
- [9] *The future of food and agriculture – Trends and challenges*, Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2017, <https://www.fao.org/3/i3325e/i3325e05.pdf>
- [10] Despotović, Ž., Jovanović, M., Stevanović, I. *Primena mobilnih solarnih jedinica u ratarstvu i stočarstvu, Zbornik radova-IV Sajam Energetske Efikasnosti i Obnovljivih Izvora Energije*, Požarevac, Srbija, (str. 11-26), Oktobar 2016.
- [11] Despotović, Ž., Jovanović, M., Rodić, A., Stevanović, I. *Praktične realizacije sistema za dvo-osno praćenje sunčeve putanje*, in Proc. VII *Sajam Energetske Efikasnosti i Obnovljivih Izvora energije*, Požarevac, Srbija, (str. 11-26), Oktobar 2019. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.33690.18880>
- [12] Rodić, A., Despotović, Ž.V., Jovanović, M.D., Popić, S., Stevanović, I. *Mobile robotic solar generator MobiSunProEnergy™-application in new energy technologies*, in Proc. VIII *International Forum for Clean Energy Technologie*, N.Sad, Serbia, 2014. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4459.5208>
- [13] Subić, J., Jovanović, M., Despotović, Ž., Jeločnik, M. Possibilities of applying robotic systems and smart sensor networks in integral agricultural apple production, in: Rodić A., Borangiu T. (Eds.), *Advances in Robot Design and Intelligent Control, Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD16)*, Vol. 540, Ch.30, pp.269-285, Springer 2016.
- https://doi.org/10.1007/978-3-319-49058-8_30
- [14] Batic, M., Vitorovic, A., Despotovic, Z. The Consideration of Optimal Control Algorithms for Hybrid Renewable Energy Systems, *In Proc. XVI International Conference YU INFO 2010*, Vol. 1/2010, Kopaonik, 03-06. Mart 2010. https://www.pupin.rs/RnDProfile/pdf/despotovic-publ_37.pdf
- [15] Despotović, Ž., Tajdić, M., Kon, J. Hibridno napajanje telekomunikacione opreme daljinskih mernih stanica u sistemima zaštite od poplava, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 350-359, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.102D>
- [16] Despotović, Ž.V., Stevanović, I.R. Hibridni besprekidni sistem napajanja za navodnjavanje povrtarskih kultura na parceli Grabovac-Obrenovac, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23., No. 2, pp. 17-25, 2021. <http://dx.doi.org/10.46793/EEE21-2.17D>
- [17] Ristić, V., Rajaković, N. *Primena Lagranžove optimizacije na problematiku proizvodnje energije iz obnovljivih izvora*, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 22, No 1-2, pp. 145-152, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.145R>
- [18] *Submersible pumps 4SR-4“*, Pedrollo SPA, https://www.pedrollo.com/public/allegati/4SR_AR_50Hz.pdf
- [19] *Emerson unidrive, User Guide Unidrive M200/201, Model size 1 to 6*, Part Number: 0478-0042-04, Issue: 4, CONTROL TECHNIQUES, 2019. <https://www.manualslib.com/manual/1248967/Emerson-Unidrive-M200.html>
- [20] *Electrically Operated Advanced Computerized Irrigation Controller*, Installation manual CMC-08-24, CEPEX, 2018. <https://www.cepexirrigation.com/wp-content/uploads/2016/04/Manual-CEPEX-CMC.pdf>
- [21] Despotović, Ž.V., Jovanović, M.D., Stevanović, I., Majstorović, M. Sprezanje i sinhronizacija grupe invertora u OFF-grid mobilnom solarnom sistemu, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 18, No. 3-4, pp. 252-260, Mart 2016.
- [22] Majstorović, M., Despotović, Ž.V., Mršević, D., Đurić, B., Milešević, M., Stević, Z. Implementation of MPPT methods with SEPIC converter, i Proc. 19th *International IEEE Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH) 2020*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9066296>
- [23] Shen C.L., Ko, Y.H. Hybrid-input power supply with PFC (power factor corrector) and MPPT (maximum power point tracking) features for battery charging and HB-LED driving, *Energy*, Vol.72, No.1, pp.501-509, August 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.072>
- [24] Djordjevic, B., Despotovic, Z.V. Digital Implementation of MPPT Algorithm in Cuk DC/DC Power Converter Based on PIC18F4520 Microcontroller, in Proc. 21th *IEEE International Symposium INFOTEH 2022-JAHORINA*, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 16-18 March 2022. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9751278>
- [25] Dahono, P.A., Tarayana, E. A New Voltage Control Method for Single-Phase PWM Inverters, *ITB J.Eng. Sci.*, Vol. 43, No. 2, pp. 139-152, 2011. <http://dx.doi.org/10.5614/itbj.eng.sci.2011.43.2.5>
- [26] Monfared, M. A simplified control strategy for single phase UPS inverters, *BULLETIN of The Polish Academy of Sciences, TECHNICAL SCIENCES*, Vol. 62, No.2, 2014, <http://dx.doi.org/10.2478/bpasts-2014-0037>
- [27] Lazzarin, T.B., Bauer, G.A.T., Barbi, I. A Control Strategy for Parallel Operation of Single-Phase Voltage Source Inverters: Analysis, Design and Experimental Results, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 6, June 2013. <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2009.5414804>

AUTORI/AUTHORS

dr Željko V. Despotović, Institut “Mihajlo Pupin”, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)

dr Aleksandar Rodić, Institut “Mihajlo Pupin”, Univerzitet u Beogradu, aleksandar.rodic@pupin.rs, ORCID [0000-0002-5595-9724](https://orcid.org/0000-0002-5595-9724)
msr Ilija R. Stevanović, master inž. mašinstva, Institut “Mihajlo Pupin”, Univerzitet u Beogradu, ilija.stevanovic@pupin.rs

Primena CFD-a i veštačke inteligencije za predikciju sagorelosti i vremena zadržavanja čestica biomase u reaktoru

Application of CFD and Artificial Intelligence for Prediction of Biomass Particle Burnout and Residence Time in the Reactor

Mileta Žarković*, Vladimir Antonijević*, Aleksandar Milićević**, Srđan Belošević**

* Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

** Laboratorija za termotehniku i energetiku, Institut za nuklearne nauke „Vinča” - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu

Rezime - U planiranju razvoja energetskog sektora sve veća pažnja se poklanja obnovljivim izvorima energije, kao što je biomasa. Proces (ko)sagorevanja biomase u ložištima kotlova je izuzetno kompleksan sa mnogo spregnutih parametara. Zbog toga se pristupa razvoju i primeni kompjuterske mehanike fluida i veštačke inteligencije, kao efikasnih alata za analizu fizičkih i hemijskih procesa koji se odvijaju tokom sagorevanja. U radu su predstavljeni primenjeni CFD kod i metodologija primene adaptivnih neuro-fazi sistema (ANFIS) iz oblasti mašinskog učenja za predviđanje stepena sagorelosti i vremena zadržavanja čestica biomase u reaktoru snage 150 kW. Razmatrani su test-slučajevi sagorevanja tri vrste sprašene biomase raznih prečnika i faktora oblika. Baza podataka sa vrednostima stepena sagorelosti i vremenima zadržavanja čestica dobijena je pomoću numeričkih simulacija upotrebom sopstvenog razvijenog kompjuterskog koda. Rezultati primene ANFIS-a na formiranoj bazi ukazuju na mogućnost pouzdane procene stepena sagorelosti čestica biomase i vremena njihovog zadržavanja na osnovu poznavanja vrste, prečnika i faktora oblika goriva koje se unosi u ložište. Prezentovani modeli predstavljaju dobru osnovu za implementaciju i primenu CFD-a i ANFIS modela na raznim termo-energetskim postrojenjima, u cilju procene efikasnosti sagorevanja goriva u ložištu.

Ključne reči – biomasa, CFD, ANFIS, reaktor

Abstract - In planning the development of the energy sector, increasing attention is paid to renewable energy sources, such as biomass. The process of (co)combustion of biomass in boiler furnaces is extremely complex with many coupled parameters. Because of that, the development and application of computational fluid mechanics and artificial intelligence are approached, as efficient tools for the analysis of physical and chemical processes that take place during combustion. The paper presents the applied CFD code and the methodology of application of adaptive neuro-fuzzy systems (ANFIS) in the field of machine learning for predicting the biomass particle burnout and residence time in a 150 kW reactor. Test cases for combustion of three types of pulverized biomass with different diameters and shape factors were considered. A database with the values of mass burnout and residence time of particles was

obtained by means of numerical simulations using the in-house developed computer code. The results of ANFIS application on the formed base indicate the possibility of a reliable assessment of mass burnout and residence time of particles, based on knowledge of the type, diameter and shape factors of the fuel introduced into the furnace. The presented models represent a good basis for the implementation and application of CFD and ANFIS models at various thermal energy plants, in order to assess the efficiency of fuel combustion in the furnace.

Index Terms – Energy, Biomass, CFD, ANFIS, Reactor

I UVOD

U planiranju razvoja energetskog sektora sve veća pažnja se poklanja obnovljivim izvorima energije, kao što je biomasa. Biomasa se smatra neutralnim gorivom sa stanovišta produkcije CO₂, zato što se njenim sagorevanjem emituje približno ista količina CO₂ u atmosferu koliko biomasa koristi prilikom svog rasta u procesu fotosinteze. Dakle, glavna motivacija za sagorevanje biomase je smanjenje emisije CO₂ kao takozvanog gasa staklene bašte, ali se može doprineti i redukciji emisija SO_x i NO_x, zavisno od sastava goriva. Takođe, kosagorevanje (istovremeno sagorevanje dva ili više goriva) uglja i biomase u velikim termoenergetskim postrojenjima predstavlja efikasnu i isplativu opciju koja doprinosi redukciji štetnih emisija i iskorišćenju biomase kao obnovljivog izvora energije [1,2].

Dvofazna višekomponentna turbulentna strujanja sa procesima sagorevanja goriva u ložištima su izuzetno složena, sa mnoštvom međusobno spregnutih uticaja. Složenost strujanja, kompleksnost postrojenja, nedostatak merne opreme i cena, često onemogućavaju, odnosno otežavaju eksperimentalna ispitivanja. Zbog toga se pristupa razvoju i primeni matematičkih modela baziranih na teorijskim razmatranjima fizičkih i hemijskih procesa, i empirijskim vrednostima dobijenim na osnovu eksperimentalnih ispitivanja.

Numeričke studije iz dostupne literature ukazuju na izuzetan značaj CFD-a u razmatranoj problematici, pri čemu se može zaključiti da većina autora u svojim simulacijama primenjuje komercijalne programe, dok razvoj modela i unapređenje

podmodela pojedinačnih procesa pri sagorevanju predstavljaju značajan istraživački izazov. Treba naglasiti da upravo rad na razvoju sopstvenog kompleksnog modela procesa predstavlja najbolji način za sticanje znanja i iskustva u oblasti modeliranja i numeričkih simulacija.

Primena mašinskog učenja u oblasti energetike je razmatrana u više radova [3-5], gde se mašinsko učenje koristi u različite svrhe, kao što su: predikcija proizvodnje i potrošnje energije, predikcija cene električne energije [3], zamena proračuna tokova snaga [4] i rada različitih vrsta relejne zaštite [5]. Fazi logika se koristi u različitim proračunima u energetici gde postoji određena neizvesnost i subjektivizam [6]. U radovima [7-9] su opisani svi osnovni koraci implementacije fazi logike: fazifikacija, formiranje baze pravila i defazifikacija. U veoma malom broju radova se koristi spoj veštačkih neuralnih mreža i fazi logike.

Adaptivni neuro-fazi sistemi do sada nisu korišćeni u cilju procene efikasnosti sagorevanja goriva u ložištu. U ovom radu ANFIS je primenjen kao spoj veštačkih neuralnih mreža i fazi logike u cilju dobijanja pravila između odabranih ulaza i stepena sagorelosti i vremena zadržavanja čestica biomase na izlazu iz reaktora. Na osnovu baze podataka dobijene primenom sopstvenog razvijenog CFD modela, fazifikacija ulaza i formiranje pravila je automatizovano odrađeno, a rezultati formiranih sistema se mogu sagledati kroz grafički prikaz u softverskom alatu MATLAB [10].

U drugom delu rada opisan je predmetni reaktor i definisane su razmatrane biomase. U trećoj sekciji rada ukratko je opisan sopstveno razvijeni CFD model. Četvrta sekcija rada sadrži osnove vezane za primenu ANFIS-a. Peta sekcija prikazuje primenu ANFIS-a kroz grafičke i numeričke rezultate. Na kraju rada dati su zaključci i mogućnosti za dalji rad i razvoj prikazane metodologije.

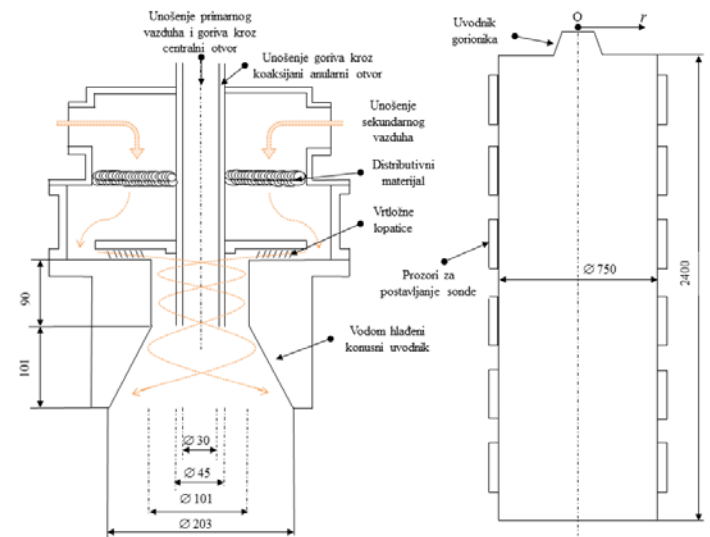
II PREDMETNI REAKTOR I RAZMATRANE BIOMASE

U predmetnom eksperimentalnom reaktoru (detaljno opisanog u [11]), snage 150 kW, visine 240 cm i unutrašnjeg prečnika 75 cm, moguće je nezavisno unositi dve vrste nepomešanih goriva (slika 1). Sastoji se od šest odvojenih sekcija složenih jedna na drugu, pri čemu svaka sekcija sadrži četiri prozora (12 x 30 cm) koji se otvaraju i omogućavaju pristup komori reaktora. Vrtložni gorionik se nalazi na vrhu ložišta, pri čemu uneta sprasena biomasa i vazduh struje naniže. Na ulazu u komoru nalazi se vodom hlađeni konusni difuzor sa uglom konusa od 30°.

Vrtložni gorionici su konstruisani tako da obezbede stabilnost plamena i da proizvedu kratak i intenzivan plamen u nastojanju da se smanji dimenzija ložišta i poveća stepen sagorelosti goriva. Oba ova cilja se ispunjavaju vrtloženjem sekundarnog vazduha pre ulaska u ložište. Recirkulacija vrelih produkata sagorevanja obezbeđuje stabilnost plamena, dok vrtložni sekundarni vazduh povećava mešanje goriva i vazduha, kreirajući intenzivan plamen.

Temperature primarne struje i čestica biomase iznose 310 K, dok je temperatura sekundarnog vazduha 600 K. Temperature zida reaktora i vodom hlađenog konusnog difuzora iznose 1273 K i 293 K. Razmatrana su 180 test-slučaja pri sagorevanju tri vrste sprasene biomase: fine slame (*fine straw*), borovine (*pinewood*) i

namenski gajene trave (*switchgrass*), različitih prečnika (od 60 μm do 650 μm) i faktora oblika (od 0,5 do 0,95).



Slika 1. Poprečni presek gorionika i unutrašnjost ložišta

III CFD MODEL

Matematički model predstavlja skup diferencijalnih jednačina, početnih i graničnih uslova i pratećih algebarskih izraza, kojima se opisuju fizički i hemijski procesi od interesa, u ovom slučaju dvofazno reaktivno turbulentno strujanje gas-čestice. Prvi korak u procesu matematičkog modeliranja je pravilno sagledavanje fizikalnosti problema i njegovo uspešno opisivanje matematičkim sistemom jednačina.

U modelu se razmatra stacionarno turbulentno strujanje nestišljivog fluida. Proces u gasovitoj fazi su opisani po Euler-ovom pristupu vremenski osrednjenim parcijalnim diferencijalnim jednačinama održanja mase, količine kretanja, energije, masenih udela pojedinačnih komponenata gasne faze, kinetičke energije turbulencije i njene disipacije ($k-\varepsilon$ model turbulencije). Kretanje disperzne (čvrste) faze (čestice sprasenog goriva, koksnog ostatka i pepela) je modelirano u Lagrange-ovom polju. Uticaj čvrste faze na gasovitu uzet je u obzir preko posebnih izvornih članova (*Particle Source in Cell* metoda) u transportnim jednačinama za gas, dok je uticaj turbulencije fluida na čestice razmatran uvođenjem difuzione brzine čestice [11]. Modeliranje hemijskih reakcija čestica biomase obuhvata podmodele isparavanja vlage, oslobađanja i sagorevanja volatila, kao i sagorevanje koksnog ostatka. Za modeliranje devolatilizacije čestice koristi se empirijski *single kinetic rate model* potpomognut podmodelima za određivanje sastava i količine volatila. Homogena reakcija volatila kao i njihova brzina je kontrolisana kako hemijskom kinetikom sagorevanja, tako i turbulentnim mešanjem gasova [1]. Heterogene reakcije oksidacije koksnog ostatka razmatraju se u kombinovanom kinetičko-difuzionom režimu [2]. U usvojenom kompleksnom modelu sagorevanja, pretpostavljeno je da se promena mase čestica sprasenog goriva u vremenu odvija pri konstantnoj gustini čestica, a da se zapremina i prečnik čestica smanjuju (tzv.

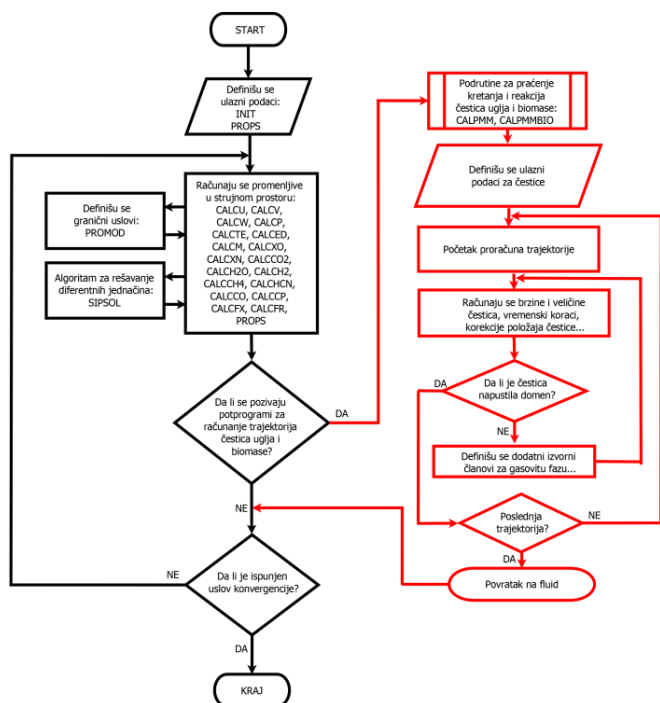
shrinking core model). Ukupna promena mase čestica u modelu sagorevanja se računa kao zbir gubitka mase čestica usled isparavanja vlage, devolatilizacije i sagorevanja koksnog ostatka. Kada se masa čestica smanji ispod određene granice tako da ostane samo pepeo, reakcije sagorevanja se završavaju.

Sve transportne jednačine turbulentnog strujanja, jednačine totalnih flukseva zračenja i jednačine koncentracije čestica se formalno mogu opisati generalnom diferencijalnom jednačinom za definisane proračunske čvorove prostora:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi)}_{\text{nestacionarni član}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U\Phi)}_{\text{konvektivni član}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}\right)}_{\text{difuzijski član}} + \underbrace{S_\Phi}_{\text{izvorni član}} \quad (1)$$

pri čemu Γ_Φ označava transportni koeficijent difuzije za opštu promenljivu Φ [12], a za stacionarni tok prvi član je jednak nuli.

Nakon formiranja matematičkog sistema jednačina pristupa se numeričkom rešavanju sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina pomoću numeričkih metoda. Kontinualno strujno polje se na zadovoljavajući način aproksimira konačnim brojem kontrolnih zapremina, parcijalne diferencijalne jednačine se diskretizuju metodom kontrolnih zapremina, a dobijeni sistem linearnih algebarskih jednačina numerički rešava. Algebarske jednačine se rešavaju iterativno, a stabilizacija iteracionog postupka se izvodi tehnikom podrelaksacije. Za rešavanje problema strujanja fluida usvojen je izmešten raspored promenljivih za komponente brzine, koji obezbeđuje dobru povezanost polja brzine i pritiska. Za rešavanje sistema algebarskih linearnih diferencijalnih jednačina dobijenih metodom kontrolnih zapremina, korišćen je tzv. SIP algoritam. Pomoću SIMPLE algoritma implicitno se sprežu jednačine za količine kretanja i jednačina kontinuiteta preko jednačine za korekciju pritiska [12]. Programiranje je izvršeno primenom programskog jezika FORTRAN. Dijagram toka kompjuterskog programa prikazan je na slici 2.



Slika 2. Dijagram toka kompjuterskog programa [13]

Za CFD simulacije razmatranih slučajeva primenjene su tri struktuirane uniformne numeričke mreže u dvodimenzionom reaktoru, koje se sastoje od 5080, 19656 i 77308 ćelija (gruba, srednja i fina mreža, redom). U okviru verifikacije numeričkog koda, stabilnost kompjuterskog programa i konvergencija numeričkih rešenja testirani su za uslov nezavisnosti rezultata od numeričke mreže. Na osnovu studije uticaja mreže, usvojena je numerička mreža od 19656 ćelija (252 x 78) koja je dovoljna da se postigne tačnost rešenja nezavisno od broja ćelija u mreži [14]. Programski kod se zaustavlja posle 5000 iteracija, ispunjavajući zadati kriterijum konvergencije.

Validacija modela prikazana je u radu [14]. Dobijena su sasvim zadovoljavajuća slaganja rezultata numeričkih simulacija sa referentnim merenjima u reaktoru, pogotovo s obzirom na kompleksnost analiziranih procesa i razmatranog modela. Za veličine za koje nije bilo referentnih eksperimentalnih podataka izvršena je parametarska analiza numeričkih rezultata i utvrđeno je da model daje fizički logične odgovore na promenu razmatranih parametara.

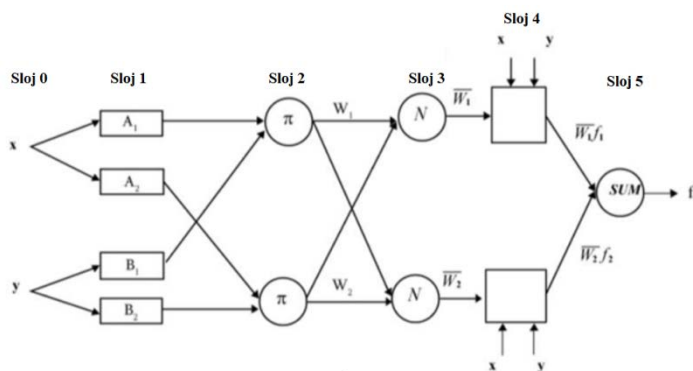
Na osnovu numeričkih simulacija formirana je baza od 180 test slučajeva, gde za potrebe mašinskog učenja ulazne vrednosti čine vrsta, prečnik i faktor oblika goriva (koji ulazi u izraze za kretanje i sagorevanje čestice [1, 14]), a izlazne stepen sagorelosti i vreme zadržavanja čestica biomase na izlazu iz reaktora. Treba istaći da su uočene nelinearne zavisnosti ulaznih i izlaznih vrednosti posledica u najvećoj meri vrtložnog strujanja u reaktoru.

IV ANFIS

Mašinsko učenje je metodologija koja omogućava računarima da uče bez eksplicitnog programiranja. Ono se zasniva na prepoznavanju obrazaca i teoriji računskog učenja, kao i korišćenju statistike u cilju učenja na osnovu prethodno dostupnih podataka, projektovanju i razvoju odgovarajućih algoritama. Osim što predstavlja spoj statistike, optimizacije i linearne algebre, oslanja se i na teoriju grafova, funkcionalnu analizu, ali i na druge matematičke oblasti. Algoritmi za mašinsko učenje spadaju u jednu od dve glavne kategorije: nadgledano (*Supervised Learning*) i nenadgledano učenje (*Unsupervised Learning*). Veštačke neuralne mreže, ANN, spadaju u grupu nadgledanog učenja gde je neophodno predznanje o tome kakvi rezultati modela treba da budu. ANN predstavljaju novu generaciju sistema za informaciono procesiranje koje pokazuje osobinu učenja i generalizacije na osnovu podataka kojima se obučavaju. Setovi podataka u bazi podataka je neophodno da imaju rezultat, tj. izlaznu vrednost za svaki ulazni set podataka. Teorija Fazi skupova (*Fuzzy Set Theory*) uvedena je sa osnovnim ciljem da se na matematički formalizovan način reprezentuje i modeluje neodređenost u lingvistici. Jedna od najvažnijih osobina teorije Fazi skupova jeste njena mogućnost da izrazi stepen neodređenosti i omogućujući aproksimativno rezonovanje koje se može formirati na bazi podataka i nastalog iskustva.

Neuralnim mrežama i Fazi sistemima zajednička je njihova mogućnost upravljanja nelinearnim, dinamičkim sistemima za koje ne postoji odgovarajući matematički model. Nedostatak neuralnih mreža je to što nije jasan način na koji je rešen

upravljački problem odnosno manjak interpretabilnosti. Neuralne mreže nemaju mogućnost generisanja ni uspostavljanja bilo kakve vrste strukturnog znanja na primer u formi pravila, niti mogućnost korišćenja prethodnog znanja kako bi se smanjilo vreme obučavanja. Nasuprot tome, fazi sistemi potpuno transparentno vrše zaključivanje kroz skup konkretnih lingvističkih pravila, ali imaju nedostatak postojanja odgovarajućih algoritama učenja koji bi vršili njihova podešavanja na osnovu baze podataka. Neuralne mreže i fazi sistemi su dinamički sistemi koji obavljaju paralelnu obradu kako bi ocenili ulazno-izlaznu relaciju bez korišćenja matematičkog modela već samo učenjem na osnovu iskustva i dobijenog uzorka. U fazi sistemima ulazno-izlazne relacije su date eksplicitno u formi *if-then* pravila, dok neuralne mreže ne definišu eksplicitne relacije već su one na neki način sadržane u njihovim parametrima. Jedan od rezultata najuspešnije integracije Fazi sistema i neuralnih mreža jeste ANFIS (*Adaptive Network based Fuzzy Inference System*) koji je inače jedan od najčešće primenjivanih neuro-fazi modela. Dakle ANFIS je klasa adaptivnih mreža koje su funkcionalno ekvivalentne Fazi zaključivanju, pri čemu se koriste prednosti i neuralnih mreža i fazi logike. Jedna od glavnih karakteristika ovog sistema je njegova prilagodljivost, tj. njegove funkcije pripadnosti izvide se na osnovu podataka koji opisuju ponašanje sistema datih preko ulazno-izlaznih promenljivih sistema. Kod ovakvog pristupa nije potrebno manuelno vršiti fazifikaciju i podešavati funkcije pripadnosti, već se one same formiraju na osnovu dostupne baze podataka. Iz tog razloga je poželjno imati što veću relevantnu bazu podataka, jer će se na taj način sistem bolje i realističnije obući, istrenirati, sa ciljem donošenja zaključaka. Dakle, ANFIS sam vrši fazifikaciju ulaza i izlaza Sistema.



Slika 3. Arhitektura ANFIS-a

U cilju objašnjenja ANFIS tehnike na slici 3 predstavljena je petoslojna arhitektura ANFIS-a gde svaki od slojeva ima svoju jasno određenu ulogu. Kvadratni čvorovi, adaptivni čvorovi poseduju parametre dok kružni, nepromenjivi čvorovi nemaju parametre. Skup parametara određene adaptivne mreže je unija skupa parametara svih adaptivnih čvorova. Kako bi se postigla željena ulazno-izlazna preslikavanja, vrši se podešavanje parametara prema skupu za trening metodom koja se bazira na najbržem pronalaženju ekstremuma putem izvoda. Dakle čvorovi su razvrstani u sledeće slojeve:

- Sloj 1: svaki čvor ovog sloja je kvadratni čvor i obavlja funkciju:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

gde je x ulaz u čvor i , a A je lingvistički pojam kao na primer (malo, veliko, ...) koji je vezan za datu funkciju čvora. Drugim rečima, O je zapravo vrednost funkcije pripadnosti A koja označava u kojoj meri dato x pripada fazi skupu A_i . Funkcije pripadnosti se mogu predstaviti različitim oblicima: trougaona, trapezoidna, sigmunoidna... Najčešće korišćena je zvonasta funkcija sa maksimalnom vrednošću u 1 i minimalnom u 0:

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (3)$$

pri čemu je (a_i, b_i, c_i) skup parametara koji se odnose na premisu pravila koje je potrebno optimizovati kroz proces učenja.

- Sloj 2: svaki čvor ovog sloja je kružni i označen je π i njegov zadatak je da množi ulazne signale i zatim ih prosleđuje sledećem sloju.

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), i = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Izlaz iz svakog čvora predstavlja ukupnu jačinu pravila. Umesto množenja ovde se mogu primeniti i drugi operatori. Množenje predstavlja konjukciju lingvističkih pojmova A i B i formira pravilo.

- Sloj 3: čvorovi ovog sloja su kružni i označeni N . Njihov zadatak je da vrše izračunavanja kojim se dobija normalizovana jačina i -tog pravila:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

gde su w_i jačine svih pravila. Za svaki čvor računa se odnos jačine i -tog pravila prema sumi jačina svih ostalih pravila.

- Sloj 4: svaki čvor i , ovog sloja je kvadratni čvor, koji obavlja funkciju

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i), i = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

gde su (p_i, q_i, r_i) skup parametara koji se odnose na zaključak.

- Sloj 5: predstavljen je krugom i računa ukupni izlaz kao sumu svih ulaznih signala:

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}, i = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

Svrha korišćenja predstavljene strukture i algoritma jeste da se parametri funkcije pripadnosti ne biraju proizvoljno, već da se određuju prema ulazno-izlaznim podacima. Parametri povezani sa funkcijama pripadnosti se menjaju kroz proces učenja. Izračunavanje ovih parametara (ili njihovo podešavanje) olakšava gradijentski vektor. Ovaj gradijentski vektor određuje koliko dobro sistem fazi zaključivanja modeluje ulazno-izlazne podatke za određeni skup parametara. Kada se dobije vektor

gradijenta, može se primeniti bilo koji od nekoliko načina optimizacije kako bi se prilagodili parametri i smanjila mera greške. Ova mera greške se obično definiše sumom kvadratne razlike između stvarnih i željenih izlaza. ANFIS koristi hibridni algoritam koji kombinuje *backpropagation* metodu najstrmijeg spusta (engl. *backpropagation gradient descent*) i metodu najmanjih kvadrata kako bi se kreirao fazi sistem zaključivanja koji je sposoban da uči. Dakle, funkcije pripadnosti se iterativno podešavaju na osnovu ulazno-izlaznog skupa za treniranje. *Backpropagation* algoritmom se podešavaju parametri funkcija pripadnosti premisa dok se metodom najmanjih kvadrata podešavaju koeficijenti linearne kombinacije zaključka.

U poređenju sa drugim neuro-fazi tehnikama, ANFIS poseduje efikasnije algoritme učenja, treniranje je brže a softver jednostavniji. Iako je jedan od prvih integrisanih modela, pokazao se kao najbolji aproksimator i najbrže je konvergirao u poređenju sa drugim neuro-fazi modelima. Nedostatak ovog modela je to, što se za probleme velikih dimenzija definiše veliki broj pravila pa određivanje optimalne strukture postaje previše računski složeno. Mnoge analize pokazale su da broj fazi pravila eksponencijalno raste sa porastom broja elemenata. Još jedna mana ANFIS-a je ograničenost na Sugeno tip fazi zaključivanja nultog ili prvog reda; ograničenost na samo jedan izlaz jer se kao metod defazifikacije koristi ponderisana suma. Sva pravila imaju iste težine, značajnosti i broj izlaznih funkcija pripadnosti mora biti jednak broju pravila.

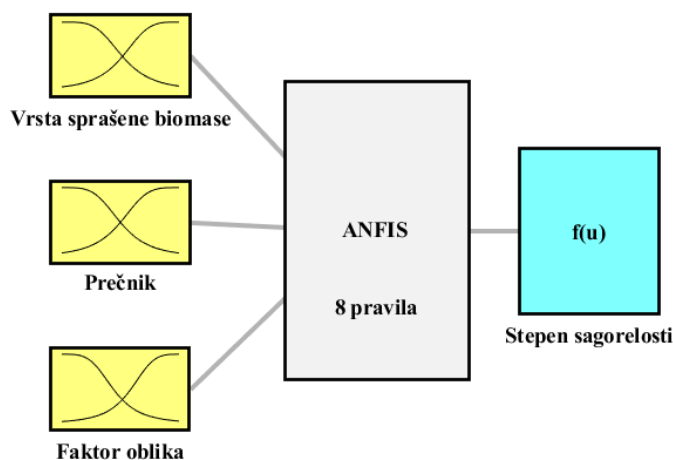
V REZULTATI IMPLEMENTACIJE ANFIS-A

U radu su predstavljena dva ANFIS Sistema: jedan za predviđanje stepena sagorelosti i drugi za predviđanje vremena zadržavanja čestica biomase u reaktoru snage 150 kW. Razmatrani su test-slučajevi sagorevanja tri vrste sprasene biomase raznih prečnika i faktora oblika. Dakle, oba ANFIS sistema imaju tri ulaza: vrstu sprasene biomase, prečnik i faktor oblika, dok su izlazi: stepen sagorelosti i vreme zadržavanja čestica. Potrebno je naglasiti da stepen sagorelosti ukazuje na efikasnost sagorevanja čestica goriva, dok vreme zadržavanja čestice u ložištu takođe utiče na njenu sagorelost, pa je interesantan parametar koji upotpunjava analizu složenog procesa sagorevanja. Baza podataka dobijena je pomoću numeričkih simulacija upotrebom sopstvenog razvijenog kompjuterskog koda. Deo baze podataka od 147 setova je korišćen za trening ANFIS-a, a deo od 36 setova za validaciju. Na slici 4 prikazan je izgled formiranog ANFIS sistema za stepen sagorelosti koji je formiran pomoću programskog alata MATLAB. Oba ANFIS sistema su obučeni u 10 epoha tako da imaju 34 čvora sa 32 linearna i 18 nelinearnih parametara. Broj pravila koji je formiran je 8.

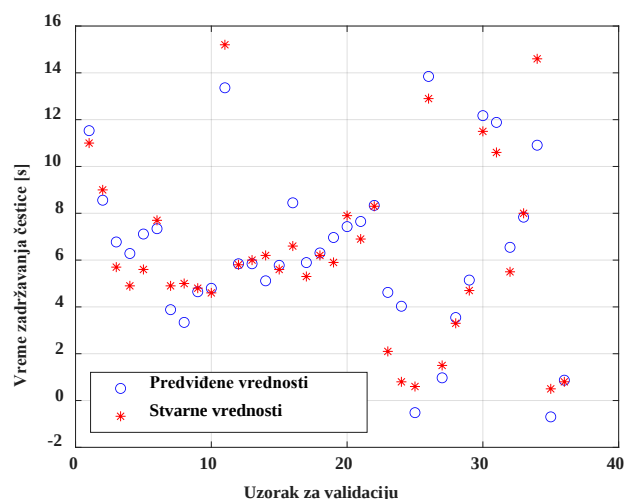
Greška koja je posmatrana kao merilo pri obučavanju i testiranju je *Root Mean Square Error* RMSE prema formuli:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (8)$$

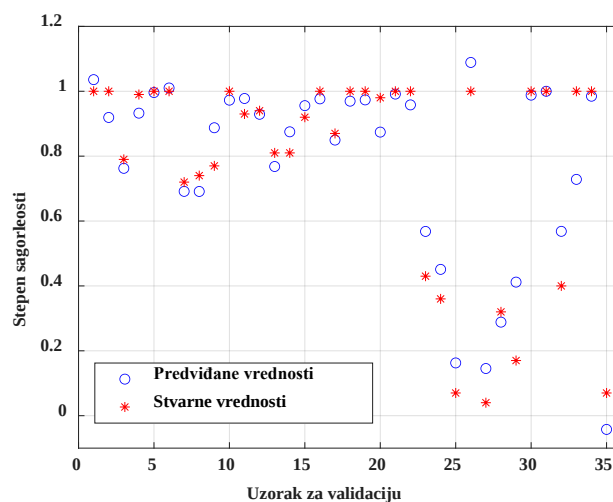
Greška pri obučavanju za stepen sagorelosti je 0,088007, a za vreme zadržavanja čestica je 1,101149, dok su se kod testiranja iste greške očekivano malo uvećale 0,0896 i 1,2679, redom.



Slika 4. Arhitektura ANFIS –a



Slika 5. Prikaz rezultata testiranja za vreme zadržavanja čestice



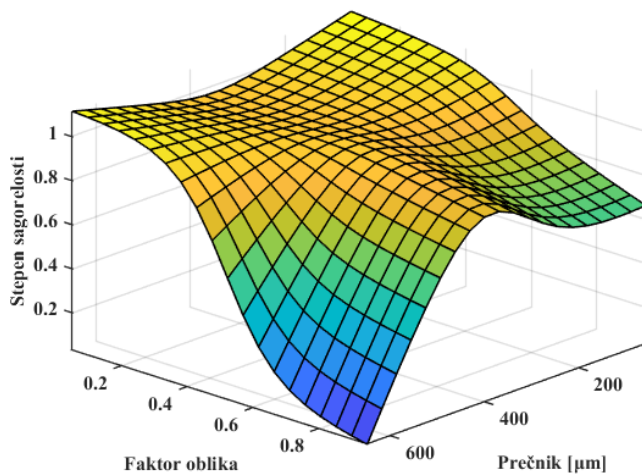
Slika 6 Prikaz rezultata testiranja za stepen sagorelosti čestice

Na slikama 5 i 6 prikazani su grafički rezultati testiranja za oba izlazna parametra (stepena sagorelosti-SS i vremena zadržavanja

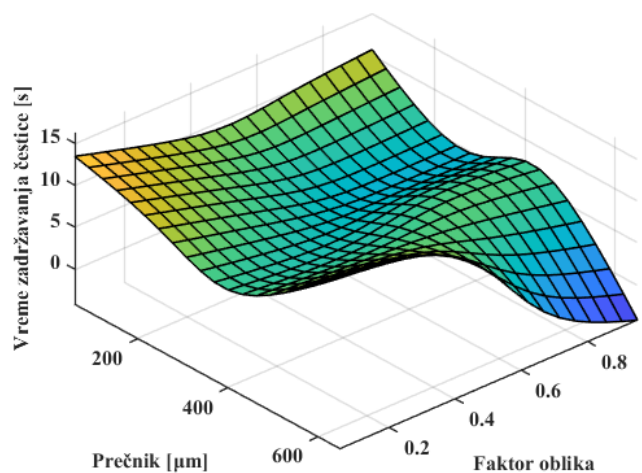
čestica u reaktoru-VZ), gde su poređene dobijene (stvarne) vrednosti CFD-a i predviđene vrednosti ANFIS-a, dok su u Tabeli 1 prikazani rezultati u numeričkom obliku za skup od 6 test ulaza. Na slikama 7 i 8 prikazana je trodimenzionalna zavisnost ulaza i izlaza koja je formirana od strane ANFIS-a na bazi obučavanja. Ovakva zavisnost predstavlja grafičku prenosnu funkciju između ulaza i izlaza i omogućava uvid u očekivane vrednosti izlaza ANFIS-a za proizvoljne vrednosti ulaza.

Tabela 1. Poređenje rezultata testiranja

Vrsta biomase	Prečnik	Faktor oblika	SS	SS _{ANFIS}	VZ	VZ _{ANFIS}
Fine straw	60	0,90	1,00	1,0358	11,0	11,5302
Fine straw	110	0,60	1,00	0,9193	9,0	8,5587
Pinewood	530	0,85	0,43	0,5680	2,1	2,6204
Pinewood	580	0,70	0,36	0,4510	0,8	1,0287
Switchgrass	565	0,70	0,04	0,1454	1,5	0,9704
Switchgrass	575	0,60	0,32	0,2884	3,3	3,5458



Slika 7. Prikaz zavisnosti stepena sagorelosti od prečnika i faktora oblika



Slika 8. Prikaz zavisnosti vremena zadržavanja čestice od prečnika i faktora oblika

VI ZAKLJUČAK

U radu je razmatrana primena ANFIS-a iz oblasti mašinskog učenja kao mogućnost da se proceni stepen sagorelosti i vreme zadržavanja čestica biomase u reaktoru. Baza za primenu ANFIS-a je dobijena korišćenjem sopstvenog razvijenog diferencijalnog matematičkog modela i numeričkog koda, koji omogućavaju predviđanje i numeričku simulaciju turbulentnih transportnih procesa i hemijskih reakcija u ložištu pri sagorevanju sprasjenih goriva.

Prikazani rezultati omogućavaju uspostavljanje zavisnosti između ulaza proračuna i izlaza i kao takvi omogućavaju korisniku procenu vezanu za proces sagorevanja u reaktoru. Greške procene poslužiće za dalji rad autora za poređenje sa drugim metodologijama mašinskog učenja u cilju dobijanja što preciznije procene.

Prezentovani modeli predstavljaju dobru osnovu za nastavak istraživanja u cilju implementacije CFD-a i ANFIS modela na termo-energetskim postojenijima, u cilju procene efikasnosti sagorevanja goriva u ložištu.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Milićević, A., Belošević, S., Crnomarković, N., Tomanović, I., Tucaković, D., Mathematical modelling and optimisation of lignite and wheat straw co-combustion in 350 MWe boiler furnace, *Applied Energy*, Vol. 260, 114206, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114206>
- [2] Milićević, A., Belošević, S., Crnomarković, N., Tomanović, I., Stojanović, A., Tucaković, D., Deng, L., Che, D. Numerical study of co-firing lignite and agricultural biomass in utility boiler under variable operation conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 181, 121728, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121728>
- [3] Kotur D., Žarković M. Neural Network Models for Electricity Prices and Loads Short and Long – Term Prediction, in *Proc. EFEA, 2016, IEEE*, Belgrade, Serbia, pp. 1-5, September 2016. <https://doi.org/10.1109/EFEA.2016.7748787>
- [4] Žarković M., Šošić D. ANN for Solving the Harmonic Load Flow in Electric Power Systems with DG, In *Proc. Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower, 2016)*, IET, Belgrade, Serbia, pp. 1-4, November 2016. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0990>
- [5] Azniza, A., Othman, M. L., Kurreemun, K. B. Z., Hizam, H., Norhafiz, A.. Adaptive ANN based differential protective relay for reliable power transformer protection operation during energisation, *International Journal of Artificial Intelligence*, Vol. 8, No. 4, 2019. <http://doi.org/10.11591/ijai.v8.i4.pp307-316>
- [6] Žarković M., Stojković Z. Artificial intelligence based thermographic approach for high voltage substations risk assessment, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 14, pp. 1935-1945, 2015. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0076>
- [7] Žarković M., Stojković Z. Analysis of artificial intelligence expert systems for power transformer condition monitoring and diagnostics, *Electric Power Systems Research*, Vol. 149, pp. 125-136, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.04.025>
- [8] Žarković M., Stojković Z. Fuzzy logic and artificial neural network based thermography approach for monitoring of high voltage equipment, *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol. 52, Is. 1, pp. 81-96, 2015. <https://doi.org/10.1177/0020720915570541>
- [9] Žarković M., Stojković Z. Model fuzzy ekspertskog sistema za procenu performansi elektroenergetskog sistema, in *Proc. 33. Savetovanje CIGRE Srbija, Ref. R C4-09*, Zlatibor, 6 – 8. jun 2017.

- [10] Stojković, Z. *Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici – primena programskih alata*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Akademska misao, Beograd, 2009.
- [11] Damstedt, B.D. *Structure and Nitrogen Chemistry in Coal, Biomass and Cofiring Low-NO_x Flames*, Brigham Young University - Provo, 2007.
- [12] Belošević, S., Tomanović, I., Crnomarković, N., Milićević, A. Full-scale CFD investigation of gas-particle flow, interactions and combustion in tangentially fired pulverized coal furnace, *Energy*, Vol. 179, pp. 1036-1053, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.066>
- [13] Belošević, S., Tomanović, I., Crnomarković, N., Milićević, A., Tucaković, D. Numerical study of pulverized coal-fired utility boiler over a wide range of operating conditions for in-furnace SO₂/NO_x reduction, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 94, pp. 657-669, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.162>
- [14] Milićević, A., Belošević, S., Crnomarković, N., Tomanović, I. Softver za numeričku simulaciju direktnog kosagorevanja ugljenog praha sa biomasom, bitno poboljšano tehničko rešenje, metod primenjen u Republici Srbiji, Institut za nuklearne nauke „Vinča”, 2021.
- [15] Milićević, A., Belošević, S., Tomanović, I., Crnomarković, N., Tucaković, N. Development of mathematical model for co-firing pulverized coal and biomass in experimental furnace, *Thermal Science*, Vol. 22, 1B, pp. 709-719, 2018. <https://doi.org/10.2298/TSCI170525206M>

AUTORI/AUTHORS

dr Mileta Žarković - docent, Elektrotehnički fakultet Univerzitet u Beogradu, mileta@etf.rs, ORCID [0000-0001-5855-6595](https://orcid.org/0000-0001-5855-6595)

mr Vladimir Antonijević - mast.inž.el. i rač., Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, antonijevic@etf.rs,

dr Aleksandar Milićević - naučni saradnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Univerzitet u Beogradu, amilicevic@vin.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-4615-8789](https://orcid.org/0000-0003-4615-8789)

dr Srđan Belošević - naučni savetnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Univerzitet u Beogradu, vlbelose@vin.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-9842-8408](https://orcid.org/0000-0001-9842-8408)

Korelacija između strujnog opterećenja i temperature za elektroenergetski kabl instaliran u vertikalnoj PVC cevi

Correlation between Load Current and Temperature for a Power Cable Installed in a Vertical PVC Pipe

Marko Šućurović*, Dardan Klimenta**, Dragan Tasić***, Bojan Perović**

* Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka – Čačak

** Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet tehničkih nauka – Kosovska Mitrovica

*** Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet – Niš

Rezime - U ovom radu se analizira zagrevanje kabla sa izolacijom od etilen-propilen gume (EPR) instaliranog u vertikalnoj cevi od polivinil-hlorida (PVC). Konkretno, razmatra se zagrevanje EPR kabla koji se koristi za napajanje potapajuće pumpe za vodu i analizira se gornji deo cevnog bunara gde je prostor između EPR kabla i unutrašnje površine PVC cevi ispunjen vazduhom. Temperature površine kabla određene su analitički, a zatim su tako dobijene vrednosti potvrđene numerički primenom metode konačnih elemenata (MKE) u COMSOL-u. Uz ove proračune, izvršeni su eksperimenti na fizičkom modelu dela cevnog bunara između statičkog nivoa vode i betonskog poklopca bunara. Ustanovljeno je da se procentualno odstupanje izračunatih vrednosti temperature površine kabla u odnosu na izmerene pri različitim strujnim opterećenjima kreće od 1.47% do 4.63%. Nakon eksperimentalne potvrde izračunatih vrednosti za temperaturu površine kabla, izveden je analitički izraz (tj. korelacija) koji definiše zavisnost te temperature od strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine cevi. Na kraju je izveden i analitički izraz za strujno opterećenje kabla u funkciji od temperature površine kabla i temperature unutrašnje površine cevi, koji se dalje može koristiti za određivanje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja bilo kojeg elektroenergetskog kabla za poznate eksploatacione uslove.

Ključne reči - elektroenergetski kabl, metoda konačnih elemenata (MKE), PVC cev, strujno opterećenje, temperatura.

Abstract - The heating of an ethylene-propylene rubber (EPR) insulated cable installed in a vertical polyvinyl chloride (PVC) pipe is analysed in this paper. In particular, this paper considers the heating of an EPR cable used to energize a submersible water pump and analyses the upper part of the well where the space between the EPR cable and the inner surface of the PVC pipe is filled with air. The temperatures of the cable's surface are determined analytically, and then such temperature values are validated numerically by using the finite element method (FEM) in COMSOL. In addition to these calculations, experiments are performed on a physical model representing the part of the well between the static water level and the solid concrete cover of the

well. The percentage deviation of the calculated values for the cable's surface temperature from the measured ones at different load currents ranges from 1.47% to 4.63%. After the experimental validation of the calculated values for the cable's surface temperature, an analytic expression (i.e. correlation) that defines the dependence of that temperature on the load current and the pipe's inner surface temperature is derived. Finally, an analytic expression for the cable load current as a function of the cable's surface temperature and the pipe's inner surface temperature is also derived, which can be further used to determine the ampacity of any power cable for known service conditions.

Index Terms - Finite element method (FEM), Load current, Power cable, PVC pipe, Temperature

I UVOD

Fotonaponski (PV) pumpni sistemi za snabdevanje pijaćom ili tehničkom vodom obično se koriste u oblastima koje su značajno udaljene od distributivne mreže. Ovakvi sistemi se sastoje od PV generatora, kontrolera za praćenje tačke maksimalne snage PV generatora i rada pumpe, potapajuće pumpe, napojnog kabla pumpe, odgovarajućih zaštita, rezervoara za vodu i cevovoda. Postupak proračuna PV pumpnog sistema predstavljen je u [1], dok se brz način proračuna sa primerom primene u voćarstvu može naći u [2,3]. Za ovakve sisteme mogu se koristiti pumpe sa jednosmernim motorima bez četkica (tzv. BLDC motori). Za napajanje električnog motora takve pumpe koristi se elektroenergetski kabl čija dužina zavisi od pozicije kontrolera, udaljenosti bunara od PV generatora i dubine potapanja pumpe. Bunar se izrađuje u vidu bušotine u koju se zatim utiskuje PVC cev koja sprečava eroziju zemljišta i urušavanje zidova bunara. U cev se zatim spušta potapajuća pumpa zajedno sa napojnim kablom i crevom za vodu. Konačno, pumpa je uronjena u vodu i okačena o sigurnosnu sajlju. Napojni kabl pumpe se proteže vertikalno kroz cev i prolazi kroz različite ambijentne uslove na putu od pumpe do kontrolera. Kabl je u gornjem delu cevnog bunara okružen vazduhom, dok je u donjem delu istog potopljen u vodu. Odnos dužina delova kabla koji će se naći u vazduhu i u vodi zavisi od dubine cevnog bunara,

statičkog nivoa vode u njemu i od dubine potapanja pumpe. Od betonskog poklopca bunara do priključnog mesta PV generatora (kontrolera ili invertora) kabl se nalazi iznad zemlje i može biti izložen direktnim uticajima Sunca i vetra. Shodno tome, napojni kabl pumpe prolazi kroz tri različita termička ambijenta, i to: deo cevnog bunara ispunjen vodom, deo cevnog bunara ispunjen vazduhom i vazduh iznad površine zemlje.

Pretpostavlja se da se za napajanje BLDC motora potapajuće pumpe koristi kabl sa izolacijom od etilen-propilen gume (tzv. EPR kabl) i tri bakarna provodnika poprečnog preseka 2.5 mm^2 . U projektu iz [4], EPR kabl ovog tipa napaja BLDC motor potapajuće pumpe tipa ECDRIVE 1800-C sa kontrolerom PS2-1800. Zbog bipolarnog pogonskog režima, u svakom trenutku, po dva namotaja BLDC motora su povezana na red [5]. Samim tim, kroz dva provodnika napojnog kabla će u svakom trenutku proticati jednosmerna struja iste jačine, ali suprotnog smera. Usled proticanja struje kroz provodnike kabla dolazi do generisanja toplote u njima. Gubici snage u kablju zavise od njegove dužine, materijala i temperature provodnika, broja opterećenih provodnika i kvadrata struje. Zbog vertikalnog položaja i različitih ambijentnih uslova kabl će imati različite temperature na pojedinim delovima svoje dužine. Toplota se sa površine kabla u cevi odvodi prirodnom konvekcijom i zračenjem. Od zida cevnog bunara toplota se dalje odvodi kondukcijom prema referentnom zemljištu. Kao što je već rečeno, napojni kabl i crevo za vodu se obično zajednički vezuju za sigurnosnu sajlu o koju je okačena pumpa. U ovom radu, nije razmatran slučaj gde se napojni kabl i crevo za vodu međusobno dodiruju, pri čemu bi trebalo uvažiti razmenu toplote između kabla i creva za vodu. Pod uslovom da se vrednosti temperature unutrašnje površine cevi i temperature vazduha u cevi ne promene, trajno dozvoljena struja kabla bi u slučaju kontakta kabla sa crevom za vodu mogla da bude veća od one koja se dobija za slučaj gde ovog kontakta nema. Tako se dobijaju vrednosti temperature površine kabla koje su sigurne sa inženjerske strane, tj. više od onih koje odgovaraju slučaju kada napojni kabl dodiruje crevo za vodu.

Za sada nije poznato da li je analiziran slučaj zagrevanja napojnog kabla neke potapajuće pumpe. Uz to, standard IEC 60287, koji se inače koristi za određivanje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja kablova, ne definiše strujna opterećenja za elektroenergetske kablove instalirane u vertikalnim cevima, dok IEEE Std 835 [6] određuje vrednosti strujnog opterećenja za elektroenergetske kablove u vazduhu instalirane u vertikalnim cevastim podizačima (eng. *risers*). Neki od primera proračuna strujnog opterećenja za elektroenergetske kablove u vertikalnim cevastim podizačima dati su u [7-9]. Slučaj koji se u ovom radu razmatra sličan je primeru instalacije elektroenergetskog kabla za napajanje naftne platforme ili dela kabla koji povezuje neki vetrogenerator na otvorenom moru sa distributivnom mrežom na kopnu [10]. Kod ovakvih primera elektroenergetski kablovi su instalirani u tzv. J-cevi. Delovi tih J-cevi koji se nalaze ispod nivoa mora ispunjeni su morskom vodom, dok su delovi istih koji se nalaze iznad nivoa mora ispunjeni vazduhom. Shodno tome, u ovom radu su analizirani rezultati proračuna i merenja izvedenih za EPR kabl $3 \times 2.5 \text{ mm}^2$ instaliran u vertikalnoj PVC cevi, koji je identičan napojnom kablju potapajuće pumpe iz [4].

U drugoj tački ovog rada opisan je način proračuna temperature površine kabla u zavisnosti od strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine PVC cevi. Vrednosti temperature dobijene za više različitih strujnih opterećenja i temperatura unutrašnje površine PVC cevi potvrđene su numerički primenom metode konačnih elemenata (MKE) u softverskom paketu COMSOL, kao i eksperimentalnim putem. Opis eksperimenata dat je u trećoj tački. Eksperimenti su realizovani u laboratoriji na EPR kablju instaliranom u vertikalnoj PVC cevi koja fizički modelira gornji deo cevnog bunara, gde je kabl okružen vazduhom. Analiziran je kabl istog tipa i istog poprečnog preseka kao što je napojni kabl potapajuće pumpe iz [4]. Četvrta tačka sadrži uporedne prikaze i opise rezultata dobijenih analitičkim, numeričkim i eksperimentalnim putem. Takođe, u ovoj tački su prikazana procentualna odstupanja izračunata za temperaturu površine kabla. S obzirom na to da su dobijena relativno mala odstupanja temperatura dobijenih analitički, model je iskorišćen za korelaciju temperature površine kabla sa strujnim opterećenjima od 0 do 60 A i temperaturama unutrašnje površine PVC cevi od 0, 10, 20, 30 i 40 °C. Na kraju je, u tački pet, izvedena korelacija između strujnog opterećenja kabla, sa jedne, i temperature površine kabla i temperature unutrašnje površine cevi, sa druge strane.

II PRORAČUN TEMPERATURE POVRŠINE KABLA

Za proračun temperature površine kabla T_k neophodno je odrediti snagu kojom se toplota razmenjuje prirodnom konvekcijom ili zračenjem između spoljašnje površine EPR kabla, sa jedne, i vazduha u cevi ili unutrašnje površine PVC cevi, sa druge strane. U jednom provodniku kabla se usled proticanja struje generiše snaga koja se pretvara u toplotu, a njena vrednost po jedinici zapremine (tzv. zapreminska snaga izvora toplote u W/m^3) dobija se pomoću sledećeg izraza

$$Q_{v1} = \frac{\rho_{20} \left[1 + \alpha_{20} (T_p - 293,15) \right] \cdot k_{at} \cdot I^2}{S_p^2} \quad (1)$$

gde je: ρ_{20} – efektivna vrednost specifične električne otpornosti materijala provodnika na temperaturi od 20°C u $\Omega \cdot \text{m}$; α_{20} – vrednost temperaturnog koeficijenta specifične električne otpornosti materijala provodnika u $1/\text{K}$; T_p – temperatura provodnika u K, k_{at} – koeficijent povećanja električne otpornosti provodnika usled použavanja, prečnika žice i prevlačenja tankim slojem drugog metala koji se određuje iz [11], I – jačina struje kroz provodnik u A i S_p – površina poprečnog preseka provodnika u m^2 .

Da bi se matematički model pojednostavio, razmatrani trožilni kabl se svodi na ekvivalentni jednožilni kabl uvođenjem ekvivalentnog provodnika. Na taj način se tri stvarna provodnika zamenjuju jednim ekvivalentnim. Snaga koja se u ekvivalentnom provodniku pretvara u toplotu po jedinici zapremine (tzv. ekvivalentna zapreminska snaga izvora toplote u W/m^3) je:

$$Q_{g,v} = Q_{v1} \cdot N_p \cdot \frac{S_p}{S_{p,ekv}} \quad (2)$$

gde je: N_p – broj opterećenih provodnika stvarnog kabla (u analiziranom slučaju je $N_p = 2$), S_p – površina poprečnog preseka

jednog provodnika stvarnog kabla u m^2 i $S_{p,ekv}$ – površina poprečnog preseka ekvivalentnog provodnika u m^2 .

Ukupna snaga koja se u ekvivalentnom provodniku pretvara u toplotu u W je:

$$Q_g = Q_{g,v} \cdot S_{p,ekv} \cdot L_k \quad (3)$$

gde je L_k – dužina kabla ili provodnika u m.

Snaga kojom se toplota razmenjuje zračenjem između površine kabla i unutrašnje površine PVC cevi u W može se odrediti pomoću izraza za razmenu toplote zračenjem između dva beskonačno duga koaksijalna cilindra [12], tj.

$$Q_{zr} = \pi \cdot d_k \cdot L_k \cdot \sigma \cdot \frac{(T_k^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_k} + \frac{d_k}{d_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right)} \quad (4)$$

gde je: σ – Stefan-Boltzmann-ova konstanta u $W/(m^2 \cdot K^4)$, T_c – temperatura unutrašnje površine PVC cevi u K, ε_k – koeficijent emisije toplote sa površine kabla, ε_c – koeficijent emisije toplote sa unutrašnje površine PVC cevi, d_k – spoljašnji prečnik kabla u m i d_c – unutrašnji prečnik PVC cevi u m.

Konačno, temperatura površine kabla u K može se odrediti pomoću izraza za razmenu toplote prirodnom konvekcijom između površine kabla i vazduha koji ispunjava prostor između kabla u unutrašnje površine cevi:

$$T_k = \frac{(Q_g - Q_{zr})}{\pi \cdot d_k \cdot L_k \cdot h_c} + T_c \quad (5)$$

gde je Q_g u W, Q_{zr} u W, d_k u m, L_k u m, T_c u K, a h_c – koeficijent razmene toplote konvekcijom između površine kabla i vazduha u $W/(m^2 \cdot K)$.

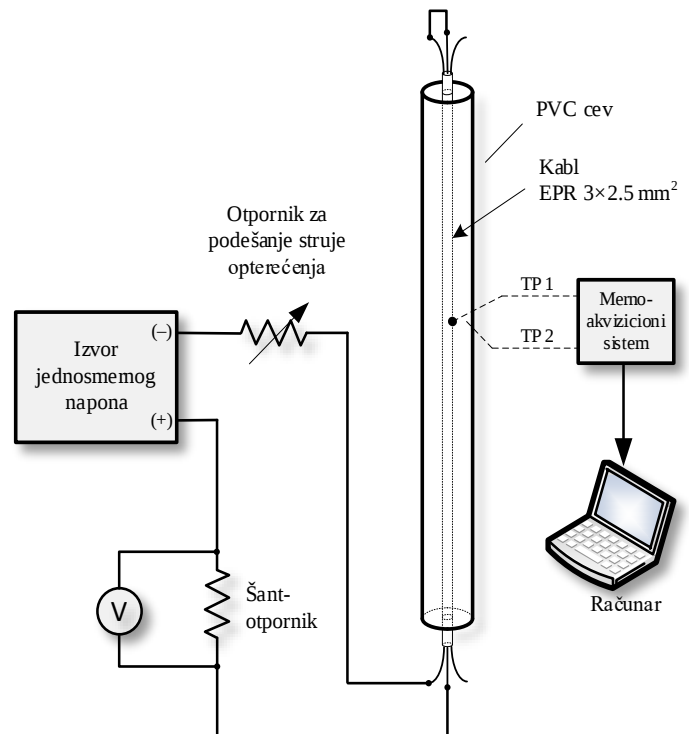
Koeficijent h_c se određuje na osnovu efektivne vrednosti specifične toplotne provodnosti vazduha između površine kabla i unutrašnje površine cevi, kao i širine vazdušnog kanala između kabla i unutrašnje površine cevi. U vezi s tim, efektivna vrednost specifične toplotne provodnosti vazduha zavisi od karakteristika vazduha koji se nalazi u kanalu između kabla i unutrašnje površine cevi. U ovom konkretnom slučaju razmena toplote vrši se prirodnom konvekcijom između površine kabla i vazduha u kanalu (cevi), koja se modelira odgovarajućom korelacijom za razmenu toplote između dva koaksijalna cilindra. Postupak proračuna je iterativan i sproveden je pomoću MATLAB programa koji su samostalno razvili autori. S obzirom da proračun količina toplote koje se sa površine kabla odvođe konvekcijom i zračenjem zahteva početnu vrednost temperature površine kabla, izvršen je odgovarajući početni proračun iste. Konačno, ovaj proračun se završava kada razlika između novodobijene i početne vrednosti temperature površine kabla postane manja od zadate tačnosti. Pri tome se pretpostavlja da je temperatura unutrašnje površine cevi T_c konstantna, a njena vrednost se zadaje kao ulazni podatak.

Posle određivanja temperature površine kabla koja odgovara nekom paru strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine cevi, vrši se provera dobijenih vrednosti pomoću

dvodimenzionalnog MKE modela kabla u softverskom paketu COMSOL Multiphysics 4.3 (Heat Transfer Module). Ulazni parametri za simulacije u COMSOL-u su sledeći: (i) temperatura unutrašnje površine PVC cevi, (ii) efektivna vrednost specifične toplotne provodnosti vazduha između površine kabla i unutrašnje površine cevi i (iii) površinska snaga razmene toplote prirodnom konvekcijom između površine kabla i vazduha u cevi (koja se dobija pomoću razvijenog MATLAB programa). Vrednosti temperature površine kabla dobijene primenom analitičkog modela realizovanog u MATLAB-u i numeričkog modela realizovanog u COMSOL-u uporedno su prikazane u tački IV.

III OPREMA I POSTUPAK REALIZACIJE EKSPERIMENTA

Na Slici 1 dat je šematski prikaz eksperimentalnog kola korišćenog za simulaciju pogona i zagrevanja napojnog EPR kabla potapajuće pumpe koji je instaliran u delu cevnog bunara sa vazduhom. U eksperimentalnom kolu je korišćena PVC cev visine 2.75 m (približno jednaka visini prostorije), unutrašnjeg prečnika 0.1056 m i debljine zida 2.2 mm. Kabl je instaliran u unutrašnjosti cevi tako da kabl i cev formiraju sistem od dva koaksijalna cilindra konačne dužine čije se podužne ose poklapaju. Vertikalna cev je sa oba svoja kraja zatvorena PVC poklopcima kroz čije središnje delove prolaze kablovske uvodnice sa kablom. Uvodnice su iskorišćene za pričvršćivanje i zatezanje kabla. Zatvaranjem cevi onemogućeno je da vazduh struji kroz cev od donjeg prema gornjem poklopcu. Primenom ovakvog fizičkog modela uvaženi su ambijentni uslovi koji vladaju u gornjem delu cevnog bunara sa vazduhom, tj. u delu cevnog bunara između statičkog nivoa vode i betonskog poklopca bunara.



Slika 1. Šematski prikaz eksperimentalnog kola za strujno opterećenje i merenje temperature površine kabla instaliranog u vertikalnoj PVC cevi

Eksperimenti su izvedeni sa trožilnim EPR kablom čiji su provodnici od bakra i imaju poprečni presek od 2.5 mm^2 . Ovaj EPR kabl se inače, zbog svoje fleksibilnosti, koristi za napajanje potapajućih pumpi. Dva provodnika ovog kabla su istovremeno opterećivana jednosmernom strujom iz spoljašnjeg izvora konstantnog napona, dok je treći bio neopterećen. Na taj način je simuliran pogon napojnog kabla BLDC motora, tokom kojeg su u svakom trenutku po dva provodnika opterećena strujom iste jačine. Opterećivanje dva provodnika strujom iste jačine ostvareno je rednim vezivanjem istih. Tako vezani provodnici su priključeni na izvor jednosmernog napona od 5 V. Na red sa ta dva provodnika vezan je i promenljivi otpornik sa ciljem da ograniči i podesi vrednost struje kroz provodnike. Jačina struje u kolu merena je pomoću šant-otpornika integrisanog u univerzalni digitalni instrument (voltmetar). Merenje temperature površine kabla i unutrašnje površine cevi realizovano je pomoću dva termopara tipa J i merno-akvizicionog sistema Agilent 34970A sa 20-kanalnim multiplexerom 34901A. Ovaj merno-akvizicioni sistem je povezan sa računarom koji prikazuje i istovremeno snima izmerene vrednosti temperatura. Termoparovi su postavljeni u istoj ravni na polovini visine kabla (termopar TP1) i cevi (termopar TP2).

Pre početka merenja svi prozori i vrata u laboratoriji bili su zatvoreni, a klima-uređaj i ostali izvori toplote isključeni. Na ovaj način je onemogućeno prinudno strujanje vazduha u laboratoriji i eliminisano dodatno zagrevanje eksperimentalnog kola. Tokom izvođenja eksperimenata, pod dejstvom zagrevanja provodnika dolazilo je do porasta električne otpornosti provodnika, a samim tim i do postepenog smanjenja jačine struje u kolu. Da bi se jačina struje držala na željenoj vrednosti ista je neprekidno praćena, a njena regulacija je vršena pomoću promenljivog otpornika. Tokom svih eksperimenata, temperatura vazduha u laboratoriji iznosila je 27°C sa odstupanjem od $\pm 2^\circ\text{C}$. Opterećivanje provodnika kabla vršeno je sa tri različite jačine jednosmerne struje, i to: 10, 14 i 20 A. Proces zagrevanja provodnika kabla bio je neprekidan, tj. kada je temperatura površine kabla dostigla ustaljenu vrednost koja odgovara jačini struje od 10 A, onda je jačina struje povećana sa 10 na 14 A, pa

se čekalo novo ustaljeno stanje i tako redom. Vremenski period zagrevanja kabla sa jednom jačinom struje približno je trajao 1 čas, odnosno sva tri eksperimenta sa dostizanjem odgovarajućih ustaljenih stanja (temperatura) trajala su oko 3 časa.

IV UPOREDNI PRIKAZ VREDNOSTI TEMPERATURE POVRŠINE KABLA DOBIJENIH EKSPERIMENTALNIM, ANALITIČKIM I NUMERIČKIM PUTEM

Kako bi izračunate i izmerene vrednosti temperature površine kabla mogle međusobno da se upoređuju bilo je neophodno postići približno iste eksploatacione uslove, tj. dobiti približno iste eksperimentalne i izračunate vrednosti za temperaturu unutrašnje površine cevi i strujno opterećenje kabla. Kada su eksperimenti u pitanju, s obzirom da temperatura unutrašnje površine cevi, osim od jačine struje (toplote generisane u provodnicima kabla), zavisi i od temperature ambijentnog vazduha (temperatura vazduha u laboratoriji), istu je bilo veoma teško regulisati. To je bio glavni razlog zbog čega su prvo merene temperature površine kabla i unutrašnje površine cevi za tri različite jačine struje, a zatim upoređene sa njima odgovarajućim vrednostima iz analitičkog i numeričkog proračuna. Temperature površine kabla/plašta (T_k) i unutrašnje površine cevi (T_c) izmerene pri jačinama struje (I) od 10, 14 i 20 A date su u Tabeli 1. Ovako izmerene temperature su dalje korišćene kao ulazni parametri za analitičke i numeričke proračune.

Za numerički proračun primenom MKE u COMSOL-u korišćeni su sledeći ulazni podaci: (i) izmerena vrednost temperature unutrašnje površine PVC cevi, (ii) efektivna vrednost specifične toplotne provodnosti vazduha u kanalu između EPR kabla i unutrašnje površine PVC cevi – dobijena primenom analitičkog modela i (iii) snaga kojom se toplota razmenjuje prirodnom konvekcijom između površine kabla i vazduha u kanalu – takođe dobijena primenom analitičkog modela. Ako se sada uporede vrednosti temperature površine kabla dobijene primenom analitičkog modela i MKE (Tabela 1), može se zaključiti da među njima nema razlike. Ovako dobijeni rezultati potvrđuju tačnost razvijenog analitičkog modela.

Tabela 1. Uporedni prikaz vrednosti temperature površine EPR kabla $3 \times 2.5 \text{ mm}^2$ dobijenih merenjem, primenom analitičkog modela i primenom MKE

Strujno opterećenje ¹⁾	Izmerene vrednosti za temperature T_c i T_k		Temperatura T_k dobijena primenom analitičkog modela u MATLAB-u ²⁾	Temperatura T_k dobijena primenom MKE u COMSOL-u ²⁾	Razlika između izmerene i izračunate vrednosti za temperaturu T_k
	T_c [$^\circ\text{C}$]	T_k [$^\circ\text{C}$]	T_k [$^\circ\text{C}$]	T_k [$^\circ\text{C}$]	ΔT_k [%]
10	28.2	32.6	32.12	32.12	1.47
14	30.4	38.8	37.42	37.42	3.56
20	34.2	49.7	47.40	47.40	4.63

1) Jačine struje koje su korišćene u eksperimentima i analitičkom modelu.

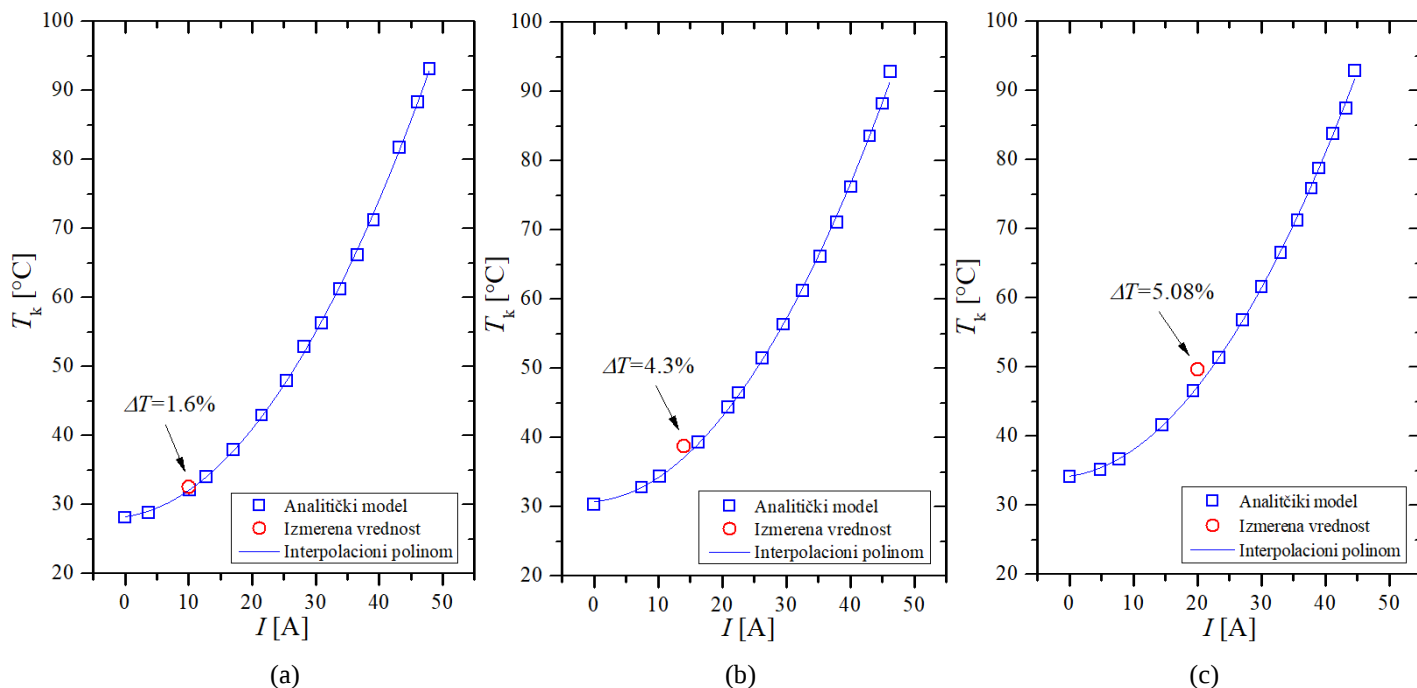
2) Za temperaturu unutrašnje površine cevi T_c zadavane su vrednosti dobijene eksperimentalnim putem.

U analitičkom modelu korišćene su vrednosti temperature unutrašnje površine cevi dobijene eksperimentalnim putem. Na osnovu njih su zatim dobijene vrednosti temperature površine kabla koje odgovaraju jačinama struje iz opsega od 0 do 48 A. Na Slici 2 prikazane su izračunate vrednosti temperature površine kabla u zavisnosti od jačine struje za tri različite

izmerene vrednosti temperature unutrašnje površine cevi, i to za T_c jednako 28.2°C , 30.4°C i 34.2°C . Potom je za svaki od ova tri slučaja određena interpolaciona funkcija, tj. polinom drugog stepena. U vezi s tim, na Slici 2 su prikazane izmerene vrednosti temperature T_k (označene kružićima) zajedno sa procentualnim odstupanjima (ΔT) između izmerenih vrednosti temperatura i

onih dobijenih pomoću interpolacionog polinoma, tj. funkcije $T_k(I)$ (označene punom linijom). Procentualna odstupanja polinomskih vrednosti u odnosu na izmerene u iznosu od 1.6, 4.3 i 5.08% ne razlikuju se značajnije od procentualnih odstupanja vrednosti dobijenih pomoću analitičkog modela u odnosu na iste izmerene vrednosti, a koje prema Tabeli 1 redom iznose 1.47,

3.56 i 4.63%. Razlike u procentualnim odstupanjima između vrednosti za temperaturu T_k sa Slike 2 i iz Tabele 1 mogu se objasniti nepotpunim poklapanjem interpolacionog polinoma (puna linija na Slici 2) sa izračunatim vrednostima temperature površine kabla (kvadratići na Slici 2).



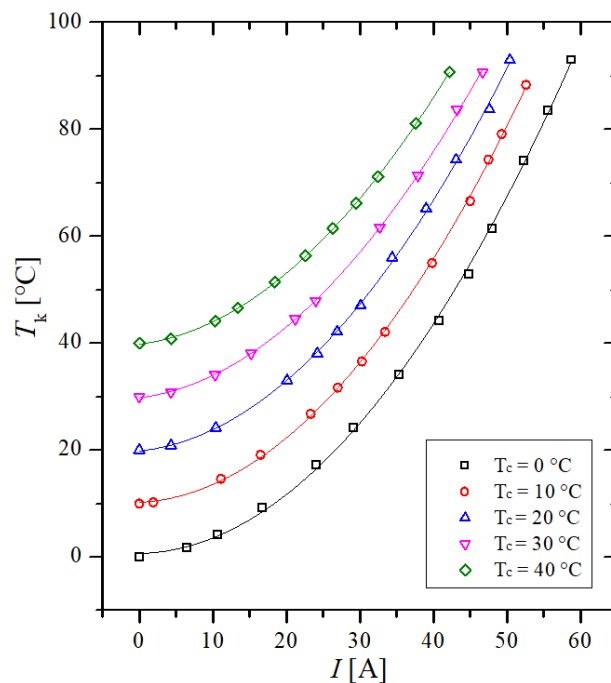
Slika 2. Temperatura površine kabla u zavisnosti od jačine struje dobijena primenom analitičkog modela i merenjem za temperaturu unutrašnje površine cevi od (a) $T_c=28.2$ °C, (b) $T_c=30.4$ °C i (c) $T_c=34.2$ °C

V KORELACIJA IZMEĐU TEMPERATURE POVRŠINE KABLA I STRUJNOG OPTEREĆENJA

S obzirom da su vrednosti temperature površine kabla dobijene primenom analitičkog modela uspešno potvrđene primenom MKE i eksperimentalnim putem, u ovom koraku se može odrediti korelacija između temperature površine kabla, sa jedne, i strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine cevi, sa druge strane. Na isti način kako je to učinjeno pri određivanju interpolacionih funkcija za $T_c=28.2$ °C, $T_c=30.4$ °C i $T_c=34.2$ °C sa Slike 2, ovde su određene interpolacione funkcije za vrednosti T_c iz opsega od 0 do 40 °C. Zatim su tako dobijene vrednosti temperature površine kabla T_k funkcionalno povezane pomoću interpolacionih polinoma. Zavisnosti temperature površine kabla od strujnog opterećenja za temperature unutrašnje površine cevi od 0, 10, 20, 30 i 40 °C prikazane su na Slici 3. Dakle, uz tačke dobijene primenom analitičkog modela, na Slici 3 su prikazane i interpolacione funkcije oblika

$$T_k = f(I) = \alpha \cdot I^2 + \beta \cdot I + \gamma, \quad \text{za } T_c = \text{const.} \quad (6)$$

gde α , β i γ predstavljaju koeficijente interpolacionog polinoma drugog stepena. Vrednosti ovih koeficijenata za svaki od pet interpolacionih polinoma, kao i srednje kvadratna odstupanja dobijenih funkcija dati su u Tabeli 2.



Slika 3. Temperatura površine kabla u zavisnosti od strujnog opterećenja za temperature unutrašnje površine cevi od 0, 10, 20, 30 i 40 °C

Tabela 2. Koeficijenti i srednje kvadratno odstupanje interpolacionih funkcija temperature površine kabla za različite temperature unutrašnje površine cevi

Temperatura unutrašnje površine cevi – T_c [°C]	Koeficijenti funkcije $T_k = \alpha \cdot I^2 + \beta \cdot I + \gamma$			Srednje kvadratno odstupanje [%]
	α	β	$\gamma^{1)}$	
0	0.02615	0.02772	0.68664 (0)	0.061
10	0.02680	0.06796	10.23518 (10)	0.032
20	0.02579	0.14148	19.85763 (20)	0.061
30	0.02446	0.17359	29.8106 (30)	0.025
40	0.02448	0.17382	39.83215 (40)	0.008

1) Van zagrada su vrednosti dobijene primenom interpolacionog polinoma (6), dok su u zagradama korigovane vrednosti

Da bi se dobila korelacija između temperature površine kabla T_k , sa jedne, i strujnog opterećenja I i temperature unutrašnje površine cevi T_c , sa druge strane, u sledećem koraku je potrebno definisati funkcionalnu zavisnost koeficijenata polinoma α , β i γ od temperature unutrašnje površine cevi T_c . Zadovoljavajuće interpolacione funkcije za zavisnosti $\alpha=f(T_c)$ i $\beta=f(T_c)$ trebalo bi da su oblika polinoma četvrtog stepena. Za koeficijent γ izvršena je korekcija vrednosti dobijenih aproksimacionim polinomom (6), a korigovane vrednosti ovog koeficijenta su date u četvrtoj koloni Tabele 2 (u zagradama). Korekcija vrednosti koeficijenta γ izvršena je sa ciljem da se dobije veća tačnost primenjenog polinoma. Vrednost koeficijenta γ predstavlja temperaturu površine kabla koja odgovara slučaju kada kroz provodnike ne protiče struja. U tom slučaju temperatura površine kabla u stacionarnom stanju jednaka je temperaturi unutrašnje površine cevi, odnosno ambijentnog vazduha. Shodno tome, proizilazi da su korigovane vrednosti koeficijenta γ jednake temperaturi unutrašnje površine cevi T_c . Konkretno, vrednosti interpolacionih koeficijenata α , β i γ mogu se redom dobiti pomoću sledećih izraza:

$$\alpha = 1.375 \cdot 10^{-9} \cdot T_c^4 + 1.40833 \cdot 10^{-7} \cdot T_c^3 - 1.34875 \cdot 10^{-5} \cdot T_c^2 + 1.84417 \cdot 10^{-4} \cdot T_c + 0.02615 \quad (7)$$

$$\beta = 3.50917 \cdot 10^{-7} \cdot T_c^4 - 3.35033 \cdot 10^{-5} \cdot T_c^3 + 9.25858 \cdot 10^{-4} \cdot T_c^2 - 2.24 \cdot 10^{-3} \cdot T_c + 0.02772 \quad (8)$$

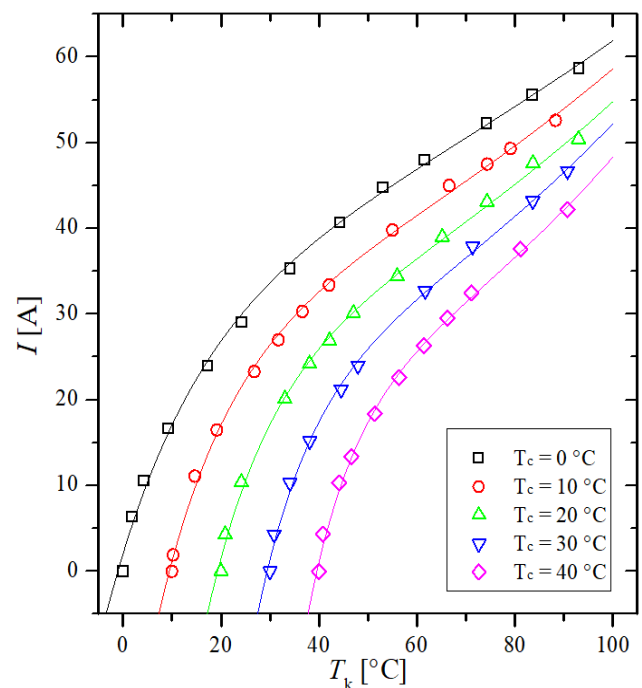
$$\gamma = T_c \quad (9)$$

U slučaju određivanja funkcionalnih zavisnosti koeficijenata α i β od temperature T_c , srednje kvadratno odstupanje interpolacione funkcije bilo je jednako nuli. Konačno, analitički izraz (6) se može koristiti za proračun temperature površine kabla T_k pod uslovom da vrednost strujnog opterećenja pripada opsegu od 0 do 48 A, a izrazi (7), (8) i (9) se mogu koristiti redom za koeficijente α , β i γ pod uslovom da vrednost temperature unutrašnje površine cevi T_c pripada opsegu od 0 do 40 °C.

VI KORELACIJA IZMEĐU STRUJNOG OPTEREĆENJA I TEMPERATURA POVRŠINE KABLA I UNUTRAŠNJE POVRŠINE CEVI

Na isti način kako je dobijena korelacija između temperature površine kabla T_k , sa jedne, i strujnog opterećenja I i temperature unutrašnje površine cevi T_c , sa druge strane, može se dobiti korelacija između strujnog opterećenja I i temperatura T_k i T_c . Tako dobijena korelacija za strujno opterećenje može se generalno koristiti za određivanje trajno dozvoljenog strujnog

opterećenja nekog kabla pod određenim eksploatacionim uslovima, kao npr. u slučaju kabla instaliranog u vertikalnoj PVC cevi kada su temperature površine kabla i unutrašnje površine cevi poznate. Na Slici 4 su date vrednosti strujnog opterećenja dobijene za različite temperature površine kabla i unutrašnje površine cevi. U pitanju su iste tačke sa Slike 3 koje su dobijene primenom analitičkog modela i MATLAB programa, s tim da su sada ove tačke predstavljene u formi zavisnosti $I=f(T_k, T_c)$.



Slika 4. Strujno opterećenje u zavisnosti od temperature površine kabla za različite temperature unutrašnje površine cevi

Funkcija koja sa zadovoljavajućom tačnošću povezuje tačke sa Slike 4 (predstavljena punom linijom) je sledećeg oblika

$$I = f(T_k) = a \cdot e^{(b \cdot T_k)} + c \cdot e^{(d \cdot T_k)}, \text{ za } T_c = \text{const.} \quad (10)$$

što znači da se korelacija između strujnog opterećenja I i temperatura T_k i T_c u razmatranom opsegu može predstaviti zbirom dve eksponencijalne funkcije, gde su a , b , c i d odgovarajući koeficijenti. Koeficijenti a , b , c i d su određeni u postupku interpolacije funkcije strujnog opterećenja za temperature unutrašnje površine cevi od 0, 10, 20, 30 i 40 °C. Vrednosti ovih koeficijenata i njima odgovarajuća srednje kvadratna odstupanja data su u Tabeli 3.

Tabela 3. Koeficijenti i srednje kvadratno odstupanje interpolacionih funkcija strujnog opterećenja za različite temperature unutrašnje površine cevi

Temperatura unutrašnje površine cevi T_c [°C]	Koeficijenti funkcije $I = a \cdot e^{(b \cdot T_k)} + c \cdot e^{(d \cdot T_k)}$				Srednje kvadratno odstupanje [%]
	a	b	c	d	
0	32.82	0.006368	-30.79	-0.05418	0.22
10	25.93	0.008168	-54.06	-0.06956	0.16
20	21.25	0.009483	-114.2	-0.07765	0.22
30	16.80	0.01135	-331.2	-0.09004	0.22
40	12.59	0.01346	-1284	-0.1037	0.26

Izrazi za koeficijente a , b , c i d iz eksponencijalne funkcije (10) mogu se izvesti na osnovu vrednosti ovih koeficijenata iz Tabele 3, tj. njihovih zavisnosti od temperature unutrašnje površine cevi T_c . Vrednosti ovih koeficijenata se sa zadovoljavajućom tačnošću mogu odrediti pomoću interpolacionih polinoma četvrtog stepena, tj.

$$a = 8.292 \cdot 10^{-6} \cdot T_c^4 - 8.275 \cdot 10^{-4} \cdot T_c^3 + 3.007 \cdot 10^{-2} \cdot T_c^2 - 0.9153 \cdot T_c - 32.82 \quad (11)$$

$$b = -5.608 \cdot 10^{-9} \cdot T_c^4 + 5.093 \cdot 10^{-7} \cdot T_c^3 - 1.378 \cdot 10^{-5} \cdot T_c^2 + 2.725 \cdot 10^{-4} \cdot T_c + 6.368 \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

$$c = -1.912 \cdot 10^{-3} \cdot T_c^4 + 9.474 \cdot 10^{-2} \cdot T_c^3 - 1.688 \cdot T_c^2 + 6.991 \cdot T_c - 30.79 \quad (13)$$

$$d = 6.092 \cdot 10^{-8} \cdot T_c^4 - 5.587 \cdot 10^{-6} \cdot T_c^3 + 1.614 \cdot 10^{-4} \cdot T_c^2 - 2.654 \cdot 10^{-3} \cdot T_c - 5.418 \cdot 10^{-2} \quad (14)$$

Izrazi za koeficijente a , b , c i d važe za vrednosti temperature unutrašnje površine cevi iz opsega od 0 do 40 °C, dok se korelacija (10) može koristiti za vrednost temperature površine kabla manju od ili jednaku 93 °C.

VII ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene analitičke i numeričke analize zagrevanja trožilnog EPR kabla instaliranog u vertikalnoj PVC cevi, kao i eksperimentalnih rezultata dobijenih pomoću fizičkog modela za deo napojnog kabla potapajuće pumpe koji je u cevnom bunaru okružen vazduhom, izvedeni su sledeći zaključci: **(i)** Uspešno je izvedena i potvrđena korelacija između temperature površine kabla, sa jedne, i strujnog opterećenja i temperature unutrašnje površine cevi, sa druge strane. **(ii)** Uspešno je izvedena i potvrđena korelacija između strujnog opterećenja, sa jedne, i temperatura površine kabla i unutrašnje površine cevi, sa druge strane. **(iii)** Procentualna odstupanja vrednosti dobijenih pomoću analitičkog modela u odnosu na izmerene vrednosti iznose 1.47-4.63% za slučaj kada se strujno opterećenje menja u granicama od 10 do 20 A. **(iv)** Procentualna odstupanja vrednosti dobijenih pomoću

analitičkog modela u odnosu na vrednosti dobijene primenom MKE jednaka su nuli, čime je potvrđena tačnost analitičkog modela. **(v)** Procentualna odstupanja interpolisanih vrednosti u odnosu na izmerene vrednosti iznose 1.6-5.08% za slučaj kada se strujno opterećenje menja u granicama od 10 do 20 A. **(vi)** Izvedena korelacija za strujno opterećenje može se generalno koristiti za određivanje trajno dozvoljenog strujnog opterećenja nekog kabla instaliranog u vertikalnoj cevi pod sledećim eksploatacionim uslovima: vrednost temperature unutrašnje površine cevi iz opsega 0-40 °C i maksimalnu vrednost temperature površine kabla od 93 °C.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Ovaj rad je zasnovan na istraživanju sprovedenom u okviru programa NIO 200155 i NIO 200132 koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Solar Powered Water Systems - Design and Installation Guide, UNICEF Water Mission, 2020. [Online] <https://watermission.org/wp-content/uploads/2020/10/Solar-Powered-Water-Systems-Design-and-Installation-Guide-Water-Mission-UNICEF.pdf>
- [2] Klimenta, D., Lekic, J., Arsic, S., Tasic, D., Krstic, N., Radosavljevic, D. A Novel Procedure for Quick Design of Off-Grid PV Water Pumping Systems for Irrigation. *Elektronika I Elektrotehnika*, Vol. 27, No. 2. pp. 64-77, 2021. <http://dx.doi.org/10.5755/402.eie.28503>
- [3] Klimenta, D., Tasic, D., Krstic, N., Radosavljević, D. Postupak projektovanja PV pumpnih sistema za navodnjavanje sa motorom jednosmerne struje i fiksnim PV panelima na osnovu istorijskih podataka o klimi sa meteoroloških online servisa. *Zbornik radova Energetika 2021*, str. 320-328, Zlatibor, Srbija, 22-25. jun 2021.
- [4] Mičić, M. Solar Pumping Project: Požarevac 3.5ha Trešnja. Belgrade. Serbia: Turn-Key Project d.o.o. 2019. [Online]. https://www.tkpenergy.com/wp-content/uploads/2019/12/Projekat_PS2-1800_35-hektara-4-sekcije-tre%C5%A1nja_Pozarevac_35m_42cbm_2880Wp.pdf [pristupljeno 18.02.2022]
- [5] Purna Chandra Rao, A., Obulesh, Y. P., Sai Babu, Ch. Mathematical modeling of BLDC motor with closed loop speed control using PID controller under various loading conditions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 7, No. 10, pp. 1321-1328, 2012. http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2012/jeas_1012_796.pdf
- [6] IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables. IEEE Std 835-1994: 3.5.7 Vertical Cables in Air-Cable Riser. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7297793?partnum=STD94232&searchProductType=IEEE%20Standards> [pristupljeno 18.02.2022]
- [7] Hartlein, R. A., Black, W. Z. Ampacity of Electric Power Cables in Vertical Protective Risers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 6, pp. 1678-1686, 1983.

- [8] Anders, G. J. Rating of cables on riser poles, in trays, in tunnels and shafts, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 3-11, 1996.
- [9] Baker, I., De Leon, F. Equivalent Circuit for the Thermal Analysis of Cables in Non-Vented Vertical Risers, IET Science Measurement Technology, Vol. 9, No. 5, pp. 606-614, 2015. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2014.0127>
- [10] Chippendale, R. D., Pilgrim, J. A., Goddard, K. F., Cangy, P. Analytical Thermal Rating Method for Cables Installed in J-Tubes, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 4, pp. 1721-1729, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2571844>
- [11] International Standard IEC 60228:2004. *Conductors of insulated cables*, 3rd ed., International Electrotechnical Commission, Switzerland, 2004.
- [12] Holman, J. P. *Heat transfer*, 10th ed., The McGraw-Hill Companies, New York, 2010.

AUTORI/AUTHORS

msr Marko Šučurović – asistent, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu. marko.sucurovic@ftn.kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-9574-6101](https://orcid.org/0000-0001-9574-6101).

dr Dardan Klimenta - redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Kosovskoj Mitrovici. dardan.klimenta@pr.ac.rs, ORCID [0000-0003-0019-8371](https://orcid.org/0000-0003-0019-8371).

dr Dragan Tasić – redovni profesor, Elektronski fakultetu Univerziteta u Nišu, dragan.tasic@elfak.ni.ac.rs, ORCID [0000-0001-5957-9617](https://orcid.org/0000-0001-5957-9617).

dr Bojan Perović – docent, Fakultet tehničkih nauka Univerzitet u Kosovskoj Mitrovici. bojan.perovic@pr.ac.rs, ORCID [0000-0001-7236-2156](https://orcid.org/0000-0001-7236-2156).

Šta to povezuje energetska tranziciju i ruralni razvoj u Srbiji?

What Connects Energy Transition and Rural Development in Serbia?

Goran Vasić

Garancijski fond AP Vojvodine, Novi Sad, Srbija

Rezime - Republika Srbija u svojoj privrednoj strukturi ima jako izraženu poljoprivrednu komponentu što je povezano i sa značajnim delom ukupne populacije koja živi i radi u ruralnim oblastima. Nacionalne politike koje tretiraju poljoprivredu i ruralni razvoj su identično kao i energetske politike pod povećanom pažnjom akademske, stručne i ukupne javnosti. Srbija se nalazi u procesu harmonizacije svog zakonodavstva i privrednog ambijenta sa pravilima poslovanja i zakonskih okvira u Evropskoj uniji. Ovaj rad analizira veze ruralnog razvoja i energetske tranzicije kao odgovora na globalne izazove poput klimatskih promena, degradacija zemljišta i narušavanja ekosistema kroz prizmu pratećih politika Evropske unije i očekivane implementacije u pravni sistem i strateške dokumente Republike Srbije. Identifikovane su oblasti preklapanja kao i komplementarne zone o kojima treba voditi računa prilikom koncipiranja budućih nacionalnih politika koje se odnose na energetiku i poljoprivredu. Uočene su i neke barijere koje je potrebno otkloniti već u ovoj inicijalnoj fazi kako bi se pristupilo formulisanju politika koje su zasnovane na pouzdanim i verifikovanim podacima.

Ključne reči - ruralni razvoj, energetska tranzicija, Evropska unija, Srbija

Abstract - The Republic of Serbia has a very pronounced agricultural component in its economic structure, which is connected with a significant part of the total population living and working in rural areas. National policies that treat agriculture and rural development are identical to energy policies under the increased attention of the academic, professional and general public. Serbia is in the process of harmonizing its legislation and economic environment with the rules of business and legal frameworks in the European Union. This paper analyses the links between rural development and energy transition in response to global challenges such as climate change, land degradation and ecosystem damage through the prism of EU policies and expected implementation in the legal system and strategic documents of the Republic of Serbia. Areas of overlap have been identified as well as complementary zones that should be taken into account when designing future national policies related to energy and agriculture. Some barriers have been identified that need to be removed at this initial stage in order to approach the formulation of policies based on reliable and verified data.

Index Terms - Rural development, Energy transition, European Union, Serbia

I UVOD

Evropska komisija, predvođena predsednicom Ursulom von der Leyen, uvrstila je klimatsku politiku među svoje glavne prioritete odmah na početku svog mandata u decembru 2019. godine. Postizanje nulte neto emisije gasova staklene bašte do 2050. godine najvažniji je i istovremeno najambicioznije postavljen cilj u saopštenju posvećenom Evropskom zelenom dogovoru [1]. Postizanje ovog cilja svrstano je u grupu srednjoročnih ciljeva sa vremenskom odrednicom do 2030. godine, a dugoročnih u vremenskom okviru do 2050. godine i kasnije. U obliku alata za sprovođenje, postavljene su nove strategije, akcijski planovi i različiti mehanizmi i procedure delovanja: Investicioni plan za održivu Evropu [2], Industrijska strategija EU [3], Akcioni plan za cirkularnu ekonomiju [4], Strategija EU za bioraznolikost do 2030. godine [5], Strategija održive poljoprivrede „Od farme do viljuške“ [6] i prekogranični mehanizam za prilagođavanje količine emitovanog ugljendioksida.

Teza da energetska tranzicija i prateće politike, kao i instrumenti podrške, mogu biti korišćeni kao novi alati koji su uključeni u mapu ukupnog ruralnog razvoja Republike Srbije, čini se opravdanom i realističnom za implementaciju. Razmatranje prisutnost i zastupljenost ovakvog razmišljanja u zvaničnim dokumentima i zakonskim rešenjima Republike Srbije najracionalnije je početi od Strategije poljoprivrede i ruralnog razvoja Republike Srbije za period 2014 – 2024. godine [7]. Tema energetske tranzicije u ovom dokumentu se spominje tek u naznakama i to u okviru odeljka o klimatskim promenama. Preciznije rečeno možemo je locirati u okviru prioritarnog područja 9. – Zaštita i unapređenje životne sredine i očuvanje prirodnih resursa, gde je navedena samo odrednica 9.5. podizanje svesti o značaju korišćenja obnovljivih izvora energije i proizvodnji energetskih useva. Ovo navođenje možemo svrstati u deklarativna opredeljenja, gde se određena tema samo navodi i gde nam autori ukazuju na činjenicu, da su svesni potrebe da se u nekom narednom periodu ova problematika detaljnije razradi. Dokument ne sadrži opis konkretnih politika, niti instrumenata ili aktivnosti koji bi doprineli realizaciji ovako postavljenih ciljeva.

II EU, ENERGETSKA TRANZICIJA I RURALNI RAZVOJ

Republika Srbija potpisala je 29. aprila 2008. godine Sporazum o stabilizaciji i pridruživanju sa Evropskom unijom (EU), koji je stupio na snagu 1. septembra 2013. godine. Ovim Sporazumom

je potvrđena perspektiva članstva Republike Srbije u EU i regulisani su međusobni odnosi dve strane do realizacije punopravnog članstva. Na osnovu toga praksa EU, njeno zakonodavstvo i predložene politike predstavljaju željeni model koji je potrebno slediti i implementirati u zakonodavni i društveni ambijent Republike Srbije. Pretragu zakonodavnog i pravnog nasleđa EU možemo početi od nedavno objavljenog dokumenta (30.06.2021. godine) pod nazivom: *A long-term Vision for the EU's Rural Areas - Towards stronger, connected, resilient and prosperous rural areas by 2040* [8]. Ovaj dokument posebno ističe da su ruralna područja značajni akteri u predstojećoj zelenoj i digitalnoj tranziciji EU. Ruralna područja EU ključni su deo evropskog načina života. Ona su dom za 137 miliona ljudi koji predstavljaju skoro 30% njenog stanovništva i preko 80% njene teritorije, uzimajući u obzir kriterijum po kome se u ovu grupu svrstavaju sve komune i opštine u Evropi sa malom veličinom ili malom gustom naseljenosti. Vekovima je „ruralno” značilo „poljoprivredno” sa milionima farmera koji neguju vrednosti tradicionalnog evropskog društva. Život u mnogim ruralnim područjima, posebno u udaljenijim i perifernim delovima, ostaje suštinski vezan za poljoprivredu – preko 40% zemljišta u ruralnim područjima koristi se za poljoprivredu. Posmatrano na duži vremenski rok može se uočiti da je sveukupni ekonomski i privredni rast doprineo smanjenju jaza između urbanih i ruralnih područja u državama članicama EU. Statistički podaci u vremenskim serijama od 2000. godine do danas, pokazuju da je bruto domaći proizvod (BDP) po glavi stanovnika u ruralnim regijama i dalje bio znatno niži (75%) od proseka EU u 2018. godini. Ekonomsko sustizanje nije doseglo udaljene ruralne regije (koji ostaju na oko 70% BDP-a EU po glavi stanovnika). Ovaj sveukupni ekonomski kontekst naglašava potrebu da se nastavi sa ekonomskom diverzifikacijom ruralnih područja, koja obuhvata sve dimenzije i sektore, kako bi se maksimalno iskoristio njihov potencijal u pogledu usluga i proizvodnje.

Autori dugoročne vizije razvoja ruralnih oblasti u državama članicama EU predviđaju formiranje Ruralnih paktova koji treba da izvrše mobilizaciju predstavnika vlasti i zainteresovanih strana u njihovom delovanju prema potrebama i težnjama ruralnog stanovništva. Prateći dokument u ovom procesu je EU ruralni akcioni plan koji ima za zadatak da otvori put jačanju teritorijalne kohezije i stvoriti nove mogućnosti za privlačenje inovativnih preduzeća i omogućiti pristup kvalitetnim poslovima, promoviše nove i poboljšane veštine, osigura bolju infrastrukturu i usluge, te iskoristiti i ulogu održive poljoprivrede kao specifične ekonomske aktivnosti.

Vizija razvoja ruralnih područja ističe bioekonomiju kao jedan od najvećih privrednih sektora Unije. Bioekonomija pokriva sve sektore i sisteme koji se oslanjaju na biološke resurse (životinje, biljke, mikroorganizme i dobijenu biomasu, uključujući organski otpad), njihove funkcije i principe [4]. Ona uključuje i povezuje: kopnene i morske ekosisteme i usluge koje pružaju; svi sektori primarne proizvodnje koji koriste i proizvode biološke resurse (poljoprivredu, šumarstvo, ribarstvo i akvakultura); i svi ekonomski i industrijski sektori koji koriste biološke resurse i procese za proizvodnju hrane, stočne hrane, proizvoda na bazi bioenergije, energije i usluga. Da bi bila uspešna, evropska bioekonomija mora imati održivost i cirkularnost u svom

središtu. Održiva bio i kružna ekonomija će stvoriti nove, raznovrsnije lance vrednosti i zelenije, ekonomičnije procese, uz zaštitu biološke raznolikosti i okoline. Bioekonomija je u 2017. godine generisala EUR 614 milijardi dodane vrednosti i zapošljavala je oko 17,5 miliona ljudi u ruralnim područjima EU.

Prilikom definisanja politika i instrumenata podrške potrebno je imati u vidu da je poljoprivredu odgovorna za 10,3% emisija gasova staklene bašte u EU, a gotovo 70% tih količina potiču od uzgoja domaćih životinja. U emisijama gasova poreklom iz poljoprivrede dominiraju takozvani ne- CO_2 gasovi (metan i oksidi azota). Pored toga treba istaći da je u prethodnom periodu poljoprivredu EU jedini veliki sistem u svetu koji je smanjio emisije gasova staklene bašte za 20% od 543.25 miliona gigatona CO_2 ekvivalenta u 1990. na 438.99 miliona gigatona ekvivalenta CO_2 u 2017. godini (Eurostat). Međutim, čak ni unutar EU, ovaj put nije bio linearan niti homogen u svim državama članicama.

Autori i donosioci politika posebno ističu pojavu velikih količina hrane koja se baca. Ovaj fenomen ima važnu društvenu dimenziju i preklapa se sa politikama upotrebe hranjivih materija i sekundarnih sirovina, proizvodnje stočne hrane, sigurnosti hrane, biološke raznolikosti, bioekonomije, upravljanja otpadom i obnovljive energije. Na nivou EU, otpad od hrane (svi koraci životnog ciklusa) ima uticaj na emisiju najmanje 227 miliona tona CO_2 ekvivalenta, odnosno oko 6% ukupnih emisija EU u 2012 [6]. Povećani fokus u EU na temi ublažavanje klimatskih promena, uključujući i generisanje obnovljive energije, prilika je za ruralna područja koju treba iskoristiti i u borbi protiv energetske siromaštva.

III ZAKONODAVNI OKVIR I POLITIKE REPUBLIKE SRBIJE

U periodu koji je ispred nas može se očekivati početak priprema nadležnih predstavnika administracije na izradi Strategije poljoprivrede i ruralnog razvoja Republike Srbije za naredno desetogodišnje razdoblje. Pravi je momenat da se budućim autorima teksta sugeriše formiranje posebnog poglavlja posvećenog energetskej tranziciji kao adekvatnom alatu i poželjnom novom instrumentu razvoja ruralnih oblasti. Pošto ova tema pokriva vrlo široko područje predlaže se strukturiranje zakonskih predloga i razvojnih instrumenata oko tri stuba, tri noseće oblasti a to su:

- politike i mere koncipirane oko energetske potrebe javnih objekata u ruralnim naseljima (škole, obdaništa, ambulate, mesne zajednice, i td.) i sprovođenja mera energetske efikasnosti u ovoj oblasti;
- uslovi stanovanja i politike i mere oko podizanja energetske standarda uslova stanovanja u ruralnim oblastima i korišćenja dostupnih lokalnih resursa u energetske svrhe kao i problema energetske siromaštva;
- proizvodnja i prerada pretežno poljoprivrednih proizvoda u ruralnim oblastima i energetska tranzicija

Ruralna naselja se razlikuju po načini organizovanja, gustini stanovanja u zavisnosti da li su locirana u ravničarskom ili brdsko planinskom delu Srbije. Zajednička osobina im je da skoro svako ruralno naseljeno mesto u Republici Srbiji slično kao i u državama EU, u svom centru ima određeni broj javnih

objekata kao što su škole, obdaništa, prostorije lokalne samouprave - mesne zajednice, ambulante, domovi kulture i sl. Troškovi grejanja i pripreme sanitarne tople vode ovih objekata se pokrivaju iz lokalnih, pokrajinskih ili republičkih budžeta dok se investicije u opremu i održavanje objekata takođe pokrivaju iz istih izvora. Lako je dokazivo da se investicije u sprovođenje mera energetske efikasnosti (izolacija, zamena stolarije, izrada fasada i sl.) i prelazak na obnovljive izvore energije kao što su biomasa, solarni paneli, toplotne pumpe u relativno kratkom roku isplate iz ušteda finansijskih sredstava koji se pre energetske tranzicije izdvajaju za fosilna goriva. Koncentracija ovih objekata je pogodna za postavljanje manjih lokalnih toplovodnih mreža na koje se mogu priključiti i stambeni objekti koji se nalaze u neposrednoj blizini. Otpočinjanje energetske tranzicije investicijama na ovim objektima pruža dobar primer ruralnom stanovništvu i kreira poverenje u ceo proces.

Atraktivnost ruralnih sredina kao primamljivog mesta za život mladih porodica, usko je povezana sa unapređenjem infrastrukture, boljom dostupnošću socijalnih usluga, poboljšanju socijalne strukture i podrške razvoju preduzetništva. Među značajne faktore spada i kvalitet stambenog prostora i promena stambenih navika. Sve je manje prihvatljiv celodnevni boravak porodice samo u jednom grejanom prostoru tokom zimskih meseci bez obzira što i savremeni farmeri najveći deo svojih aktivnosti obavljaju napolju tokom celog dana. Stanovnici ruralnih oblasti su elementarno upoznati sa potrebom sprovođenja mera energetske efikasnosti (izolacija objekta, zamena stolarije i korišćenje obnovljivih izvor energije). Organizovanje namenskih predavanja u okviru tradicionalne „zimske poljoprivredne edukacije“ značajno bi doprinelo promovisanju energetske tranzicije. Brošura koja bi se delila zainteresovanima sa pojednostavljenim informacijama tehničkog i komercijalnog sadržaja koja bi približila temu energetske efikasnosti i sadržavala dostupna tehnološka rešenja primene obnovljivih izvora energije, bila bi dobar alat u promotivnim aktivnostima. Jako je važno da se pre otpočinjanja promocije energetske tranzicije u ruralnim oblastima pristupi dizajniranju finansijskih instrumenta koji bi pratili ovu aktivnost. Iskustva razvijenih EU država ukazuju da najveći učinak postižu finansijski instrumenti koji su kombinacija „mekih“ kreditnih sredstava, grantova i subvencija.

Mnogo veći izazov za energetska tranziciju predstavlja onaj deo ruralne populacije koji spada u najsiriomasniji deo stanovništva Republike Srbije i po pravilu živi u ruralnim oblastima. Energetsko siromaštvo se najčešće procenjuje kroz udeo prihoda koja domaćinstvo troši za energiju. Taj pojam (koncept), međutim, ima znatno šire značenje. Energetsko siromaštvo ograničava (koči) ekonomski, socijalni i kulturni razvoj i napredak društva, doprinosi uvećanju socijalnih razlika i društvenih nejednakosti, a siromašne i nerazvijene gura u još veće siromaštvo i gubitništvo. Brojni dokumenti i rezolucije EU upućuju na urgentnost smanjivanja energetskog siromaštva i neophodnost razvoja energetskih politika zasnovanih na korišćenju zdravih i ekološki održivih izvora energije i unapređenja energetske efikasnosti objekata [9].

Pored primarne poljoprivredne proizvodnje u ruralnim oblastima se nalaze i značajni prerađivački kapaciteti. Na osnovu podataka

iz poslednjeg popisa poljoprivrede iz 2012. godine 260 objekata ima dozvolu za prerađu mleka. Osim toga, u registar Uprave za veterinu je upisano 1.755 objekata za prerađu mleka u domaćinstvu (proizvodnju kajmaka, odnosno belog sira koji su namenjeni domaćem tržištu). Republika Srbija raspolaže značajnim prerađivačkim kapacitetima u stočarskoj proizvodnji (1.176 objekata za klanje goveda, svinja, ovaca/koza i živine i rasecanje i prerađu mesa goveda, svinja, živine i riba). Preciznih podataka o broju hladnjača u Republici Srbiji nema. Na osnovu podataka Ministarstva iz 2011. godine, u Republici Srbiji postoje 363 hladnjače za zamrzavanje, odnosno skladištenje voća, povrća i pečurki, čiji je ukupan kapacitet oko 550.000 t. Toplom prerađom i sušenjem voća i povrća, kao i proizvodnjom sokova, bavi se 85 privrednih subjekata, čiji je ukupni instalisani kapacitet oko 565.000 t. Značajan deo prerađanih kapaciteta odnosi se na proizvodnju sokova od voća i povrća. Kapacitet proizvodnje voćnog soka na godišnjem nivou kreće se oko 240 miliona litara, što Republiku Srbiju svrstava u ozbiljne proizvođače u regionu.

Samo grubi pregled ovih prerađanih kapaciteta bez kapaciteta za prerađu šećerna repe, suncokreta i drugih uljarica, zatim kukuruza i žitarica ukazuje da se svake godine u okolini ovih prerađanih kapaciteta generiše veliki obim biomase koja nastaje kao ostatak nakon prerađivanja. Upravljanje sa tokovima ovog materijala i njegovo bezbedno odlaganje je veliki logistički i ekološki izazov. Upravo iskustva razvijenih država u novo promovisanom konceptu bioekonomije mogu sadašnje prateće troškove proizvodnje pretvoriti u nove proizvode, nove materijale, bioenergiju i nova radna mesta i nove prihode.

IV USPEŠNE POLITIKE MORAJU BITI BAZIRANE NA POUZDANIM PODACIMA

Protekle deceniju su obeležili burni politički i društveni procesi. U javnom prostoru sve više dolazi do izražaja prisustvo populizma i osporavanja racionalnih politika. Opšte je poznato da pouzdane informacije igraju vitalnu ulogu i da su neophodne za svakog dobronamernog kreatora politika koji zasniva svoje delovanje na dokazima, a ne na emocijama ili lažnim vestima. Legitimitet bilo kog političkog sistema širom sveta danas, možda više nego ikada, zavisi od njegovog efektivnog kapaciteta da uspešno isporuči dobre i ciljne rezultate. To je baza na kojoj kreatori politika treba da deluju, a kao rezultat isporučuju zakone i podzakonska akata zasnovana na činjenicama. Ove aktivnosti moraju biti zasnovane na pouzdanim podacima kako bi političke odluke bile razumljive, procenljive, održive i orijentirane na budućnost [10].

U želji da pospeši trenutno stanje i u nastojanju da se što jasnije trasira pravac budućih reformi poljoprivrednog sektora Ministarstvo poljoprivrede i zaštite životne sredine ponudilo je zakonodavcu tokom 2014. godine dokument strateškog karaktera. Rezultat tog rada je Strategija poljoprivrede i ruralnog razvoja Republike Srbije za period 2014 – 2024. godine, koji definiše ciljeve, prioritete i okvire političkih i institucionalnih reformi u oblasti poljoprivrede i ruralnog razvoja. Autori prilikom izrade ovog dokumenta skreću pažnju pažljivom čitaocu da trenutno postoji problem u definisanju i preciznom iskazivanju u smislu statističke terminologije šta se podrazumeva pod terminom „ruralno“. U napomeni se konstatuje da se od

1981. godine primenjuje upravni kriterijum za utvrđivanje tipa naselja, prema kojem su naselja podeljena na „gradska” i „ostala”. Podela je izvršena na osnovu administrativne odluke same jedinice lokalne samouprave da određeno naselje proglašeno gradskim. Sva ostala naselja koja nisu proglašena gradskim svrstana su u kategoriju „ostala” [7]. Shodno prethodno rečenom za opis stanja u ruralnim sredinama Republike Srbije u ovom dokumentu koriste se podaci zvanične statistike o „ostalim naseljima” prema definiciji Republičkog zavoda za statistiku Republike Srbije. Prema tome mi trenutno nismo u stanju da iskažemo podatak o tome koliko stanovnika živi u ruralnim naseljima, koliko im je prosečni bruto domaći proizvod, kojim privrednim aktivnostima se bave, koliko energije i kog tipa troše, itd.

Na žalost i popis koji treba da se organizuje tokom 2022. godine dočekujemo sa nerešenim ovim pitanjem. U ovom svetlu je jasno da će eventualni predlozi politika koji treba da omoguće ruralni razvoj i istovremeno pospeše energetske tranzicije biti zasnovani na procenama i proklamacijama. Biće nemoguće pratiti efekte eventualno predloženih politika, realno sagledati odnos utrošenog budžetskog novca i dobiti za društvo i populaciju koja živi u ruralnim oblastima. Biće skoro nemoguće proceniti da li je drugačijem usmeravanjem budžetskih sredstava moglo biti postignuto više pozitivnih efekata pa samim tim i svrishodnost i opravdanost preduzetih aktivnosti.

Rešenje je moguće pronaći u skladu sa analizom popisnih definicija urbanih naselja ili područja u državama članicama UN-a, navedenih u Demografskom godišnjaku Ujedinjenih naroda za 2006., te na osnovu nekoliko sličnih istraživanja. Može se zaključiti da se za određivanje tipova naselja može koristiti jedan (ili više) od pet osnovnih kriterijuma:

- veličina naselja (broj stanovnika ili stanova)
- gustina naseljenosti (broj stanovnika po jedinici površine)
- upravni (administrativni) status naselja
- socioekonomska struktura i mobilnost stanovništva (udeo poljoprivrednog stanovništva, sastav stanovništva prema sektorima delatnosti, dnevne cirkulacije zaposlenih, učenika i studenata i slično)
- urbana infrastruktura i morfološka obeležja naselja.

Izbor odgovarajuće metodologije i izbor kriterijuma koji su najpogodniji za demografske, kulturološke i socijalne ulove u Srbiji, ostaje kao budući zadatak za eksperte koji se bave ovom problematikom

V ZAKLJUČAK

Na osnovu Zakona o energetske efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije [11] među obveznike Sistema energetske menadžmenta spadaju i jedinice lokalne samouprave sa više od 20.000 stanovnika. Lokalne samouprave su u obavezi da donose Program energetske efikasnosti i Plan energetske efikasnosti. Ovim dokumentima se precizira i detaljnije razrađuju mere energetske efikasnosti i aktivnosti za njihovo sprovođenje a sadrže naročito: mere energetske efikasnosti i aktivnosti kojima se ostvaruje efikasno korišćenje energije, nosioce i rokove za sprovođenje planiranih aktivnosti, očekivane rezultate za svaku od mera, odnosno aktivnosti, finansijske instrumente (izvore i

način obezbeđivanja) predviđene za sprovođenje planiranih mera i izveštaj o realizaciji prethodnog plana energetske efikasnosti. Zakon je vrlo precizno definisao sistem energetske menadžmenta ali preliminarne informacije sa terena govore o tome da je celokupan, u suštini dobro definisan sistem, tek u početnoj implementacionoj fazi. Jasnim razdvajanjem ruralnih i urbanih delova lokalnih samouprava došlo bi se do vrlo preciznih podataka o stanju javnih objekata i njihovim energetske potrebama. Tek sa pouzdanim i preciznim podacima moguće je sačinjavati realistične i izvodljive planove i instrumente podrške.

Krajem 2013. godine Vlada Republike Srbije usvojila je Odluku o formiranju Budžetskog fonda za unapređenje energetske efikasnosti Republike Srbije ("Službeni glasnik RS", broj 92/13). Budžetski fond je počeo sa radom 2014. godine. Do sada je sprovedeno veći broj javnih poziva za (su)finansiranje projekata unapređenja energetske efikasnosti u jedinicama lokalnih samouprava i neki od njih su se odnosili i na objekte u ruralnim oblastima. Projekti su prvenstveno obuhvatili mere unapređenja energetske efikasnosti na termičkom omotaču zgrade (zamena stolarije i postavljanje termoizolacije) i mere unapređenja termotehničkih sistema (ugradnja kotlova na biomasu, ugradnja termostatskih ventila, elektronski regulisanih cirkulacionih pumpi i uređaja za merenje predate količine toplote). Realizovali su se najčešće na javnim objektima kao što su: predškolske ustanove, domovi zdravlja, osnovne i srednje škole i upravne zgrade. Osnovni nedostatak ovog načina finansiranja pored ograničenog i nedovoljnog iznosa sredstava u odnosu na potrebe je i vremenska ograničenost finansiranja na vremenski rok od jedne budžetske godine. Mnogo bolji rezultati bi se postigli ukoliko bi se formirala nezavisna finansijska institucija koja bi radila po modelu Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitosti u Hrvatskoj. Ovaj Fond predstavlja instituciju koja vrši prikupljanje vanbudžetskih sredstava i ulaganje u programe i projekte zaštite okolne, energetske efikasnosti i korišćenja obnovljivih izvora energije. Fond pored svoje osnovne funkcije ima i ulogu Posredničkog tela u sistemu upravljanja i kontrole korišćenja strukturnih instrumenata EU u Hrvatskoj, za pojedine specifične ciljeve iz područja zaštite okoline i održivosti resursa, klimatskih promena, energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije [12].

Mapa puta za cirkularnu ekonomiju u Republici Srbiji [13] je rezultat zajedničkog rada i doprinosa članova Posebne radne grupe za cirkularnu ekonomiju, koja je formirana u okviru Ministarstva zaštite životne sredine u aprilu 2019. godine. Ovo je prvi, inicijalni dokument na osnovu kojeg relevantni akteri, uključujući donosioc odluka, administracija, investitori, predstavnici akademske zajednice, inovatori, dizajneri, potrošači, građani i stručnjaci, svako iz svog domena, mogu da preduzmu aktivnosti za sistemске promene, utemeljene na odgovornijem upravljanju resursima, čime će doprineti tranziciji sa linearne na cirkularnu ekonomiju u Republici Srbiji. Tek u naznakama je spomenuta bioekonomija što upućuje na potrebu da se prilikom izrade nove unapređene verzije ovog temi posveti dužna pažnja.

Partnerstvo u oblasti bioenergije između Srbije i Baden-Virtemberga koje je uspostavljeno u septembru 2013. godine bazirano je na Strategiji EU za Dunavski region i osnovano je sa ciljem podsticanja održivog tržišta bioenergije, doprinosa

sigurnosti snabdevanja energijom i ublažavanja klimatskih promena. Partnerstvo u oblasti bioenergije sprovodi se kroz podršku GIZ-a od strane Regionalne kancelarije Jug i projekta Nemačke klimatske i tehnološke inicijative (DKTI) „Razvoj održivog tržišta bioenergije u Srbiji“. Najavljeno je da će Srbija i nemačka pokrajina Baden – Viretemberg u narednom period raditi na izradi pilot projekta bioenergetskog sela, koje će koristiti biomasu za proizvodnju električnu energiju. Pravi je momenat da se ovom projektu udahne nova energija i posveti dužna pažnja.

Sa promenama u energetske sistemima i prelaskom sa fosilnih goriva na obnovljive izvore energije, širom Evrope su počele da se pojavljuju energetske zadruge, koje su danas široko rasprostranjene pogotovo u zemljama severne Evrope. Energetske zadruge predstavljaju inovativne socijalne strukture koje rade na pronalaženju kolektivnog rešenja za probleme koji nastaju prilikom procesa energetske tranzicije. Putem energetske zadruge omogućava se proizvodnja lokalne i čiste energije, pa pored pozitivnih efekata po okolinu i zdravlje ljudi, one donose i korist i za lokalnu ekonomiju [14]. Donošenjem Zakona o korišćenju obnovljivih izvora energije u aprilu 2021. godine definisani su i zakonski uslovi za osnivanje energetske zajednice ili zadruge [15]. Ovim zakonskim promenama omogućeno je da pored poljoprivredne proizvodnje generisanje električne i toplotne energije postane jedan od značajnih privrednih aktivnosti u ruralnim oblastima.

Jedna od mera za pomoć u borbi protiv energetske siromaštva mogla bi biti i dopuna Uredbe o energetski ugroženom kupcu koja bi pored električne energije i gasa prepoznala i energetske potrebe za grejanje i pripremu sanitarne tople vode koje se mogu zadovoljiti biomasom. Među ove mere spada i pitanje zamene tradicionalnih „smederevaca“ sa pećima koje bi imale veći stepen energetske efikasnosti i bolje termičke i ekološke performanse. Socijalne karte su promovisane kao jedan od prioriteta prošle Vlade u ekspoziciji od 28. juna 2017. godine. Pomoć u realizaciji ovog projekta pružila je Danska. Zakon je konačno usvojen 11.02.2021. godine. Bez sistema socijalnih karti nije moguća sistemska borba protiv „energetskog siromaštva“. Ova tema je toliko složena i višedimenzionalna da zahteva izradu posebnog strateškog dokumenta ili bar poglavlja u izradi strategije borbe protiv ukupnog siromaštva, koja između ostalog spada i u milenijumske ciljeve UN.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] European Commission, The European Green Deal, *COM(2019) 640 final*, 2019, https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf [pristupljeno 11.08. 2021]
- [2] European Commission, Clean energy for all Europeans package completed: good for consumers, good for growth and jobs, and good for the planet | European Commission, 2019. <https://ec.europa.eu/info/news/clean-energy->

- [all-europeans-package-completed-good-consumers-good-growth-and-jobs-and-good-planet-2019-may-22_en">all-europeans-package-completed-good-consumers-good-growth-and-jobs-and-good-planet-2019-may-22_en](#) [pristupljeno 11.08. 2021]
- [3] European Commission, A New Industrial Strategy for Europe, *COM(2020) 102 Final*, 2020. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/communication-com2020102-new-industrial-strategy-europe_en [pristupljeno 11.08. 2021]
- [4] European Commission, A sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the connection between economy, society. *COM(2018) 673 final, EC-COM(2018) 673 Final*, 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A52018DC0673> [pristupljeno 11.08. 2021]
- [5] European Commission, Biodiversity strategy for 2030, 2020. https://ec.europa.eu/environment/strategy/biodiversity-strategy-2030_en [pristupljeno 11.08. 2021]
- [6] European Commission, Farm to Fork Strategy, 2019. https://ec.europa.eu/info/news/clean-energy-all-europeans-package-completed-good-consumers-good-growth-and-jobs-and-good-planet-2019-may-22_en [pristupljeno 11.08. 2021]
- [7] Vlada Republike Srbije, Strategija poljoprivrede i ruralnog razvoja Republike Srbije za period 2014–2024. godine: 85/2014–30, Службени гласник РС, 2014. <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/vlada/strategija/2014/85/1> [pristupljeno 06.08. 2021]
- [8] European Commission, A long-term vision for the EU's rural areas 2021. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/new-push-european-democracy/long-term-vision-rural-areas_en [pristupljeno 11.08. 2021]
- [9] Petovar, K. Energetsko siromaštvo i uslovi za njegovo smanjivanje, 2016. https://uploads-ssl.webflow.com/5e9038a5fc30d378d256622b/5f8d9c70754b931f9d5d9c9f_Energetsko-siromaštvo-Ksenija-Petovar-FINAL.pdf [pristupljeno 01.03.2022]
- [10] Umbach, G. G. F. C. EVIDENCE-BASED POLICY-MAKING: FROM DATA TO DECISION-MAKING - Global Governance Programme, 2019. <https://globalgovernanceprogramme.eui.eu/event/evidence-based-policy-making-from-data-to-decision-making/> [pristupljeno 01.03. 2022]
- [11] Skupština Republike Srbije, *Zakon o energetskej efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije: 40/2021–60*, Службени гласник РС, 2021. <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2021/40/4/reg> [pristupljeno 18.08.2021]
- [12] Djelatnost Fonda | Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost.” <https://www.fzoeu.hr/hr/djelatnost-fonda/1325> [pristupljeno 16.08. 2021]
- [13] Ministarstvo zaštite životne sredine - Republika Srbija, “Mapa puta,” p. 2019, 2019.
- [14] Prva energetska zadruga u Srbiji – zajedničkim naporima ka čistijoj proizvodnji energije - Energija, klima i životna sredina. <https://www.bos.rs/ekz/vesti/134/9070/prva-energetska-zadruga-u-srbiji--zajednickim-naporima-ka-cistijoj-proizvodnji-energije.html> [pristupljeno 18.08. 2021]
- [15] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije: 40/2021–23. <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2021/40/2/reg> [pristupljeno 18.08.2021]

AUTORI/AUTHORS

Goran M. Vasić, Garancijski fond AP Vojvodine, Novi Sad, Srbija, goran.vasic@garfond.rs, ORCID [0000-0002-0030-6064](https://orcid.org/0000-0002-0030-6064)

Podešavanje usmerenih zemljospojnih zaštita u prenosnoj mreži korišćenjem unapredene metode diferencijalne evolucije

Directional Ground Overcurrent Protection Setting Calculation in Transmission Network by Using Differential Evolution Algorithm

Miljana Todorović^{*,**}, Aleksandar Savić^{*}

^{*} Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

^{**} Saturn Electric d.o.o. Beograd

Rezime - U radu je predstavljen postupak podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita u prenosnoj mreži na osnovu klasičnog proračuna i primenom unapređenog algoritma diferencijalne evolucije. Kako bi sistem relejne zaštite ispunio zahteve kao što su brzina, selektivnost, koordinisanost i osetljivost, definisani su uslovi koje je neophodno uvažiti prilikom podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita. U slučaju primene optimizacione metode, problem je rešavan na dva načina. U prvom slučaju, podešenja su formirana tako da se minimizuje ukupno vreme reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita na udaljeni kvar preko velikog otpora, dok su u drugom slučaju podešenja formirana tako da maksimalno vreme reagovanja na udaljeni kvar preko velikog otpora bude minimalno. Rezultati koji su dobijeni primenom klasičnog pristupa su upoređeni sa rezultatima dobijenim primenom optimizacione metode i istaknute su prednosti i mane oba pristupa.

Ključne reči - relejna zaštita, koordinacija, optimizacija, usmerena zemljospojna zaštita

Abstract - The paper presents the procedure of directional ground overcurrent protection setting calculation in the transmission network by using classical calculation procedure and by using an advanced algorithm of differential evolution. To meet the basic requirements of relay protection systems such as speed, selectivity, coordination and sensitivity, the conditions that need to be considered when setting directional ground overcurrent protection are defined. By using the optimization method, the problem was solved in two ways. In the first case, the settings are designed to minimize the total response time of directional ground overcurrent protection to remote-end high-resistance faults, whereas in the second case the settings are designed so that the maximum response time to remote-end high-resistance fault is minimal. The results obtained using the classical approach are compared with the results obtained using the optimization method and the advantages and disadvantages of both approaches are highlighted.

Index Terms - Relay protection, Coordination, Optimization, Directional ground overcurrent protection

I UVOD

Zaštita visokonaponskih dalekovoda od kvarova sa zemljom se najčešće realizuje kombinacijom distantne i usmerene zemljospojne zaštite. S obzirom da zbog ograničenja prilikom podešavanja rezistivnog dosega distantna zaštita najčešće nije osetljiva na kvarove sa zemljom preko velike impedanse, za detekciju tih kvarova se koristi usmerena zemljospojna zaštita. Prilikom podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita je neophodno uvažiti da pored toga što zaštita treba da bude brza i osetljiva na kvarove preko velikih impedansi, ista ne sme da bude osetljiva na režime bez kvara, kao i da mora da bude koordinisana sa ostalim relevantnim zaštitama u sistemu. Metode podešavanja ovih zaštita se značajno razlikuju među kompanijama i u zavisnosti od sistema kome pripadaju, i ne postoji jedinstveno pravilo podešavanja. U radu je predstavljen jedan od načina na koji je moguće podesiti usmerene zemljospojne zaštite u delu prenosnog sistema tako da zadovoljava sve prethodno definisane zahteve, a koji se odnose na selektivnost i koordinisanost, brzinu i osetljivost, klasičnim putem, a kasnije i korišćenjem jedne od optimizacionih metoda.

Primena metoda optimizacije za podešavanje prekostrujnih zaštita sa vremenski zavisnim karakteristikama je često analizirana u literaturi. Optimalna podešenja su računata korišćenjem metoda linearnog programiranja, kao što je simpleks metoda [1], [2], zatim genetičkog algoritma [3], diferencijalne evolucije [4] i drugih. U radu je problem podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita rešen korišćenjem unapredene metode diferencijalne evolucije. Kriterijumska funkcija je definisana na dva načina. U prvom slučaju je cilj bio da se postigne minimalno ukupno vreme reagovanja na udaljeni kvar preko velikog otpora, dok je u drugom slučaju cilj bio da maksimalno vreme reagovanja na udaljeni kvar preko velikog otpora bude minimalno. Rezultati dobijeni primenom unapredene metode diferencijalne evolucije su upoređeni sa rezultatima dobijenim ako se podešenja računaju klasičnim putem. Poređenjem rezultata se uočilo da je smanjenje ukupnog vremena reagovanja na udaljeni kvar preko velikog otpora u slučaju proračuna podešenja optimizacionom metodom oko 15%.

kvadrilateralne. Osnovna zaštita dalekovoda je ostvarena prvim i drugim stepenom, dok viši stepeni predstavljaju rezervnu zaštitu za kvarove na susednim dalekovodima i kvarove na šticeu dalekovodu preko velikih otpornosti. Prvi stepen distantne zaštite deluje bez odlaganja, dok je vreme odlaganja delovanja za drugi stepen distantne zaštite podešeno na 300 ms u 400 kV mreži. Treći i četvrti stepen se podešavaju tako da na selektivan način izoluju kvarove na susednim dalekovodima ukoliko je došlo do otkaza primarne zaštite ili prekidača. Vremena odlaganja delovanja trećeg i četvrtog stepena se najčešće dobijaju dodavanjem po jednog minimalnog koordinacionog intervala na vreme odlaganja delovanja drugog, odnosno trećeg stepena, ali u određenim situacijama to mogu biti i po dva koordinaciona intervala (ukoliko je nemoguće na drugi način postići selektivnost).

- 1) Koordinisanost usmerenih zemljospojnih zaštita sa prvim i drugim stepenom distantnih zaštita za kvarove na šticeu dalekovodu

Kvarovi na šticeu dalekovodu se ne smeju izolovati pre delovanja prvog, odnosno drugog stepena distantne zaštite dalekovoda uz uvažavanje minimalnog koordinacionog intervala. Kako bi ovaj uslov bio ispunjen, neophodno je izračunati vrednosti maksimalne trostruke nulte komponente struje zemljospoja na početku dalekovoda za jednofazni i dvofazni kratak spoj sa zemljom. Vreme reagovanja usmerene zemljospojne zaštite na kvar kome odgovara najveća vrednost trostruke nulte komponente struje ne sme biti manje od 600 ms (što predstavlja vreme reagovanja drugog stepena distantne zaštite uvećano za minimalni koordinacioni interval od CTI=300 ms). Maksimalna trostruka vrednost nulte komponente struje se određuje ili ako se prilikom proračuna kratkih spojeva napon pre kvara uveća u odnosu na nominalni (najčešće se usvaja napon koji je za 10% veći od nominalnog) ili uvođenjem koeficijenta sigurnosti kojim se multiplicira vrednost struje kvara dobijena proračunom.

- 2) Koordinisanost usmerenih zemljospojnih zaštita sa višim stepenima distantnih zaštita za kvarove na susednom dalekovodu

Kvarovi na susednom dalekovodu se ne smeju izolovati pre delovanja viših stepeni distantne zaštite u okviru istog zaštitnog uređaja, a koji predstavljaju rezervnu zaštitu za kvarove na susednom dalekovodu. Kako bi ovaj uslov bio ispunjen, neophodno je izračunati maksimalne trostruke vrednosti nulte komponente struje kvara za kvarove na kraju šticeu dalekovoda (jednofazni i dvofazni kratak spoj sa zemljom bez prelaznog otpora). Vreme odlaganja delovanja usmerene zemljospojne zaštite za ove kvarove ne sme biti manje od 1,5 s.

- 3) Osetljivost na kvarove preko prelaznog otpora velike vrednosti

Usmerena zemljospojna zaštita mora biti osetljiva na kvarove sa zemljom na dalekovodu preko velikog prelaznog otpora. Vrednost maksimalnog prelaznog otpora u analiziranom sistemu je usvojena da bude 100 Ω . Kako bi zaštita bila osetljiva na pomenuti kvar, podešena prorađna vrednost mora biti manja od trostruke nulte komponente struje pri jednofaznom kvaru sa zemljom preko otpornosti od 100 Ω na udaljenim sabirnicama, sa

uvažanim koeficijentom rezerve. Sa druge strane, podešena prorađna vrednost trostruke nulte struje mora biti veća od najveće očekivane trostruke nulte struje u režimu bez kvara. U konkretnom slučaju, usvojeno je da je najveća očekivana trostruka nulta struja manja od 0,1 A sekundarnih.

- 4) Koordinisanost glavnih i rezervnih zaštitnih uređaja

Prilikom podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita, neophodno je koordinisati karakteristike usmerenih zemljospojnih zaštita susednih dalekovoda. S obzirom da su svi zaštitni uređaji u analiziranom sistemu mikroprocesorski, dozvoljeni minimalni koordinacioni interval je CTI=300 ms.

C. Kriterijumska funkcija

Prilikom primene metode diferencijalne evolucije za rešavanje optimalnih podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita, neophodno je definisati kriterijumsku funkciju. U radu je ona definisana na dva različita načina. U prvom slučaju je cilj da se postigne minimalno ukupno vreme reagovanja svih usmerenih zemljospojnih zaštita na udaljene kvarove preko velikog otpora (konkretno 100 Ω). Taj uslov je moguće napisati u sledećem obliku:

$$\min_{3I_{0pi}, TD_i} f = \sum_{i=1}^n w_i t_{i,k}$$

gde su:

$3I_{0pi}$ – podešenje prorađne vrednosti usmerene zemljospojne zaštite i -tog zaštitnog uređaja;

TD_i – podešenje vremenskog multiplikatora usmerene zemljospojne zaštite i -tog zaštitnog uređaja;

n – ukupan broj zaštitnih uređaja;

w_i – težinski faktor koji se određuje na osnovu verovatnoće da će se desiti kvar (usvojeno je $w_i=1$ za svako i);

$t_{i,k}$ – vreme reagovanja usmerene zemljospojne zaštite na zadati kvar.

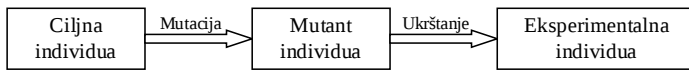
U drugom slučaju, kriterijumska funkcija je definisana tako da se postigne da maksimalno vreme reagovanja zaštita na zadate kvarove bude minimalno.

III DIFERENCIJALNA EVOLUCIJA

Diferencijalna evolucija (eng. *Differential Evolution* – DE) je jedna od često korišćenih metaheurističkih metoda za rešavanje problema globalne optimizacije. Ovaj algoritam, koji se pokazao efikasnim u rešavanju brojnih zadataka, predložili su Storn i Price 1997. godine [5]. Glavna prednost DE algoritma je ta što on koristi mali broj kontrolnih parametara, dok su mane vezane za sporu konvergenciju i stagnaciju populacije rešene u modifikovanoj verziji algoritma diferencijalne evolucije, koja se naziva MIHDE (eng. Mixed-Integer Hybrid Differential Evolution).

Kao i u slučaju većine drugih populacionih metaheuristika, početna slučajna populacija se generiše u fazi inicijalizacije. U svakoj generaciji izvršavanja, kreiraju se nove individue pomoću operatora ukrštanja i mutacije, kao što je prikazano na slici 2. Zatim se izračunava podobnost novih jedinki (eksperimentalne individue) i upoređuje se sa podobnošću starih jedinki (ciljne individue). Na osnovu rezultata ovog procesa, bolje jedinke sa

zadržavaju i prenose se u sledeću generaciju. Eksperimentalne individue se generišu ukrštanjem ciljnih individua sa jedinkama koje su nastale primenom operatora mutacije (mutant individue). U unapređenoj verziji algoritma MIHDE, koristi se dodatno i operacija migracije.



Slika 2. Primena operatora mutacije i ukrštanja

1) Inicijalizacija

Neka je D broj nepoznatih parametara, a N_p broj jedinki u populaciji. U tom slučaju je matrica nepoznatih parametara X dimenzije $N_p \times D$. Ako sa $X_i(0)$ označimo i -tu populaciju u fazi inicijalizacije, njena vrednost se dobija na sledeći način:

$$X_i(0) = X^L + r \cdot (X^U - X^L), i = 1, \dots, N_p$$

gde su:

r – nasumično izabran broj iz opsega $[0,1]$;

X^L – donja granica ograničenja nepoznatih promenljivih, matrica $1 \times D$;

X^U – gornja granica ograničenja nepoznatih promenljivih, matrica $1 \times D$.

2) Mutacija

Mutant individua se generiše na osnovu sledeće formule:

$$V_i(t) = X_{r1}(t) + r_m \cdot (X_{r2}(t) - X_{r3}(t)), i = 1, \dots, N_p$$

gde su:

r_m – mutacioni faktor; nasumično izabran realan broj iz opsega $[0,1]$;

r_1, r_2, r_3 – nasumično izabrani različiti celi brojevi iz opsega $[0, N_p]$ sa izuzećem broja i (na osnovu čega se zaključuje da je minimalan broj jedinki u populaciji 4).

3) Ukrštanje

Operacija ukrštanja se primenjuje kako bi se povećala raznovrsnost rešenja. Pomoću vrednosti izračunate mutant individue $V_i(t)$ i ciljne individue $X_i(t)$, određuje se vrednost eksperimentalne individue. Vrednosti eksperimentalne individue se ne proračunavaju, već se za svaku jedinku vrši izbor da li se vrednosti promenljivih preuzimaju iz mutant ili iz ciljne individue. Način na koji se taj izbor vrši je sledeći:

$$u_{ji}(t) = \begin{cases} x_{ji}(t), & \text{ako je } r > r_c \text{ AND } i \neq \delta \\ v_{ji}(t), & \text{ako je } r \leq r_c \text{ OR } i = \delta \end{cases}$$

gde su:

r – nasumično izabran broj iz opsega $[0,1]$ i određuje se za svaku jedinku;

r_c – zadata verovatnoća ukrštanja (veća vrednost verovatnoće rezultuje većim brojem individua koje se preuzimaju iz mutant individue);

δ – nasumično izabran celi broj iz opsega $[0, N_p]$ koji služi kao garancija da će se makar jedna jedinka sigurno preuzeti iz mutant vektora.

4) Evaluacija

Funkcija evaluacije se primenjuje poredeći vrednosti kriterijumske funkcije ciljne i eksperimentalne individue, za

svaku individuu u populaciji, a bolja jedinka se zadržava.

5) Migracija

Operacija migracije se primenjuje kako bi se povećao opseg pretrage za najboljim rešenjem, tako što će se regenerisati nova, različita, populacija jedinki. Individue koje se dobijaju migracijom se generišu na bazi najbolje individue, X_b , na sledeći način:

$$x_{ji}(t+1) = \begin{cases} x_{bi}(t) + r_1(x_j^L - x_{jb}(t)), & \text{rand} < \frac{x_{bi}(t) - x_j^L}{x_j^U - x_j^L} \cdot r_c \\ x_{bi}(t) + r_1(x_j^U - x_{jb}(t)), & \text{inače} \end{cases}$$

gde je:

r_1 – nasumično izabran broj iz opsega $[0,1]$.

Operacija migracije se primenjuje samo ukoliko nije zadovoljena raznolikost populacije, tj. u slučaju kada većina jedinki ima jako bliske vrednosti parametara. Stepenn raznolikosti populacije, η , se definiše na sledeći način:

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^D \sum_{j=1, j \neq b}^{N_p} dx_{ji} \right) / (N_p \cdot (D-1))$$

gde dx_{ji} opisuje sličnost gena između najbolje individue i posmatrane individue, i računa se na sledeći način:

$$dx_{ji} = \begin{cases} 0, & \text{ako je } \left| \frac{x_{ji}(t) - x_{bi}(t)}{x_{bi}(t)} \right| < \varepsilon \\ 1, & \text{inače} \end{cases}$$

gde je:

ε – definisani stepen odstupanja.

IV ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

U ovom poglavlju će biti prikazani rezultati dobijeni primenom MIHDE optimizacione metode, kao i rezultati koji su dobijeni na osnovu klasičnog računskog proračuna. Kako se sa povećanjem nepoznatih parametara značajno produžava trajanje proračuna primenom MIHDE metode, rešavanje optimalnih podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita je ograničeno na dva od četiri operativna područja u 400 kV prenosnoj mreži Bosne i Hercegovine, i to OP Banja Luka i OP Tuzla. Operativnim područjima Banja Luka i Tuzla pripadaju zaštitni uređaji 1-9 i 11-14. S obzirom da je dalekovod TS Višegrad – HE Višegrad električno kratak dalekovod ($SIR > 30$), njegovu zaštitu je neophodno realizovati diferencijalnom zaštitom. Usmerena zemljospojna zaštita se u tom slučaju realizuje korišćenjem komunikacione šeme, pa stoga nije neophodno koordinisati rad zaštitnih uređaja 7 i 13 na klasičan način, jer je uslov koordinacije svakako ispunjen. Stoga se problem određivanja optimalnih podešenja ograničava na zaštitne uređaje 1-9, 11 i 12.

Za potrebe proračuna parametara podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita, neophodno je u vidu ulaznih podataka obezbediti podatke o strujama kratkih spojeva od interesa. U ovom slučaju su to trostruka nulta komponenta struje u slučaju bliskog jednofaznog i dvofaznog kratkog spoja sa zemljom, trostruka nulta komponenta struje u slučaju jednofaznog i

dvofaznog kratkog spoja sa zemljom na udaljenim sabirnicama dalekovoda, kao i trostruka nulta komponenta struje pri jednofaznom kratkom spoju preko otpora od 100Ω na udaljenom kraju dalekovoda, za sve pozicije zaštitnih uređaja od interesa. Sve vrednosti struja kratkih spojeva su dobijene korišćenjem CAPE programskog paketa i prikazane su u tabeli 2. Takođe, kao ulazni podatak je neophodno izdvojiti i parove glavnih i rezervnih zaštitnih uređaja koji su prikazani u tabeli 3, a na osnovu jednodopolne šeme sa slike 1.

A. Klasični proračun podešenja

Kako bi se definisao pristup koji je primenjen prilikom podešavanja klasičnim putem, polazi se od prethodno definisane jednačine vremenski zavisne karakteristike reagovanja u opštem obliku. Uslov koordinisanosti usmerenih zemljospojnih zaštita sa višim stepenima distantnih zaštita za kvarove na susednom dalekovodu, praktično znači da vreme reagovanja usmerene zemljospojne zaštite za kvar na kraju voda sa maksimalnom vrednošću nulte komponente struje zemljospoja mora biti veće ili jednako 1,5 s. Usvaja se granični slučaj, tj. da je vreme izolovanja kvara tačno 1,5 s, te stoga važi:

$$1,5s = TD \cdot \frac{A}{\left(\frac{3I_0}{3I_{0p}}\right)^B - 1}$$

gdje su:

TD – vremenski multiplikator krive;

$3I_0$ – veća od dve vrednosti trostruke nulte komponente struje zemljospoja za jednofazni ili dvofazni kratak spoj na kraju voda (vrednost iz tabele 2);

$3I_{0p}$ – podešenje praga reagovanja zaštitne funkcije.

Time je dobijena prva jednačina sa dve nepoznate. Druga jednačina se dobija iz uslova da pri trostrukoj nultoj komponenti struje zemljospoja koja je jednaka dvadesetostrukoj vrednosti praga reagovanja zaštitne funkcije, vreme odlaganja delovanja zaštite bude tačno 1,2 s (čime se postiže koordinacija glavnih i rezervnih usmerenih zemljospojnih zaštita), to jest:

$$1,2s = TD \cdot \frac{A}{(20)^B - 1}$$

Time se jednoznačno određuje vrednost za vremenski multiplikator krive. Eventualne promene ovako generisanih podešenja se mogu javiti ukoliko trostruke nulte komponente struje bliskih jednofaznih i dvofaznih kratkih spojeva nisu veće od dvadesetostrukve vrednosti podešenja praga reagovanja ili proračunato podešenje praga reagovanja usmerene zemljospojne zaštite bude manje od donje granice podešenja, što nije bio slučaj u analiziranom primeru.

Prilikom formiranja podešenja, razmatrana su tri tipa inverznih karakteristika: IEC normalno inverzna, IEC veoma inverzna i IEC ekstremno inverzna karakteristika. Ukoliko se u prethodno definisanu jednačinu za proračun vremenskog multiplikatora uvrste vrednosti parametara A i B koji odgovaraju IEC ekstremno inverznoj krivi ($A=80$, $B=2$), dobija se vrednost za vremenski multiplikator oko 6, što je značajno više od gornje granice podešavanja vremenskog multiplikatora u najvećem broju

zaštitnih uređaja (najčešće je to 1,1 ili 3). Dakle, neophodno je uporediti rezultate dobijene ukoliko je primenjena IEC NI karakteristika na svim pozicijama sa rezultatima ukoliko je primenjena IEC VI karakteristika na svim pozicijama. Ukoliko se kao kriterijum definiše ukupno vreme reagovanja na udaljene kvarove preko otpora od 100Ω , u slučaju primene IEC NI karakteristika to vreme iznosi 71,2 s, dok je u slučaju primene IEC VI karakteristika to vreme više nego dvostruko veće (152,34 s). Stoga je lako zaključiti da je optimalnije primenjivati IEC normalno inverzne karakteristike. Rezultati proračuna podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita realizovanih sa IEC NI karakteristikama su dati u tabeli 4, a kasniji proračun optimalnih podešenja primenom MIHDE metode je rađen sa pretpostavkom da su sve vremenski zavisne karakteristike takođe IEC normalno inverzne. Provera uslova koordinacije parova rezervnih i glavnih zaštita podešenih na klasičan način je data u tabeli 5.

Neophodno je napomenuti da su prilikom podešavanja zaštita klasičnim pristupom fiksirana vremena reagovanja na bliske i udaljene kvarove (na 1,2 s i 1,5 s), kako bi se obezbedio CTI od 300 ms. Međutim, dopušteno je da vreme izolovanja bliskih kvarova bude i niže (ne manje od 600 ms), kao i da vreme reagovanja na udaljene kvarove bude više od 1,5 s. Stoga se može očekivati da se rešenje unapredi primenom MIHDE algoritma, jer na ovaj način određeno rešenje svakako nije optimalno po pitanju minimizacije sume vremena reagovanja zaštita na kvarove, niti po pitanju minimizacije maksimalnog vremena reagovanja na kvarove.

B. Proračun primenom MIHDE metode

Algoritam unapredene metode diferencijalne evolucije je realizovan u programskom paketu MATLAB. Primenom algoritma su određene optimalne vrednosti struje prorade i vremenskog multiplikatora IEC NI krive usmerenih zemljospojnih zaštita tako da su zadovoljeni svi prethodno definisani uslovi koji se tiču brzine, selektivnosti, koordinisanosti i osetljivosti rada usmerenih zemljospojnih zaštita. Optimalno rešenje se definiše kroz kriterijumsku funkciju, koja je u radu definisana na dva načina. U prvom slučaju cilj je da se minimizira suma vremena reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita za jednofazne kvarove sa zemljom preko otpora od 100Ω na kraju dalekovoda, dok je u drugom slučaju cilj da se minimizira maksimalno vreme reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita za jednofazne kvarove sa zemljom preko otpora od 100Ω na kraju dalekovoda.

U tabeli 6 su data podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita dobijena MIHDE metodom, za slučaj primene prve kriterijumske funkcije. Provera uslova koordinacije parova rezervnih i glavnih zaštita je data u tabeli 7. U tabeli 8 su data podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita istom metodom u slučaju da je primenjena druga kriterijumska funkcija, dok je u tabeli 9 data odgovarajuća provera koordinacije parova glavnih i rezervnih zaštita.

C. Poređenje rezultata dobijenih primenom dve različite metode

Na osnovu poređenja rezultata dobijenih primenom klasičnog proračuna podešenja (tabela 4) i rezultata dobijenih primenom

MIHDE metode sa dve različito definisane kriterijumske funkcije (tabele 6 i 8), dolazi se do sledećih zaključaka:

1) Ako se kao kriterijumska funkcija posmatra suma vremena reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita na jednofazne kvarove sa zemljom preko otpora od 100Ω na kraju dalekovoda, zaključuje se da je rešenje koje je dobijeno primenom MIHDE metode značajno unapređeno. Vrednost kriterijumske funkcije je snižena za više od 15%, tačnije sa 71,2 s na 60,665 s. Takođe, maksimalno vreme reagovanja svih zaštita na udaljeni jednofazni kratak spoj preko 100Ω , je sniženo sa 9,745 s na 8,397 s.

2) Ako se kao kriterijumska funkcija posmatra maksimalno vreme reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita na jednofazne kvarove sa zemljom preko otpora od 100Ω na kraju dalekovoda, primenom MIHDE metode se značajno smanjuje maksimalno vreme reagovanja – sa 9,745 s na 6,936 s. Potrebno je napomenuti da suma svih vremena reagovanja na udaljene jednofazne zemljospojeve preko otpora od 100Ω u tom slučaju iznosi 73,952 s, što je vrednost jako bliska vrednosti koja se dobija klasičnim putem. Stoga se zaključuje da je sigurno ispravnije podesiti usmerene zemljospojne zaštite na način koji se dobija primenom MIHDE metode.

Tabela 2. Vrednosti trostruke nulte komponente struje zemljospoja za pet karakterističnih kvarova na 400 kV dalekovodima

Pozicija releja	Prenosni odnos ST	Blizak k1z	Blizak k2z	k1z na kraju voda	k2z na kraju voda	k1z+100 Ω na kraju voda
1	800	3144,7	3152,3	1836	1909,7	449,5
2	800	7102,8	7388	3089,3	3096,8	1039,1
3	800	6068,5	6312,1	2570,1	2541,4	339
4	800	14550,5	14388,4	2897,4	3013,7	709,3
5	1600	12740,5	12598,6	4772,2	4617,2	645,3
6	1600	11922,3	11535,1	4390,2	4341,3	579,1
7	800	15219,6	15050,1	1768,1	1921,4	496,3
8	800	5950,6	6466,4	1902,6	1881,4	252,1
9	1600	14871,7	14706	2611,1	2534	503,9
11	1600	14569,4	14096,2	3070,9	2582,2	444,6
12	1600	14044,4	13588,3	3650,2	3178,1	545,1

Tabela 3. Definisani parovi glavnih i rezervnih zaštitnih uređaja u analiziranoj prenosnoj mreži

Rezervni	1	3	3	3	4	5	5	6	6	6	8	8	8
Glavni	3	5	7	9	2	11	12	4	7	9	4	5	9

Tabela 4. Podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita dobijena klasičnim putem, IEC NI

Pozicija releja	TD	PU	t (blizak k1z)	t (blizak k2z)	t (k1z na kraju voda)	t (k2z kvar na kraju voda)	t (k1z+100 Ω na kraju voda)
1	0,53	0,21	1,230	1,229	1,515	1,489	3,733
2	0,53	0,35	1,202	1,202	1,508	1,507	2,792
3	0,53	0,29	1,202	1,202	1,506	1,513	9,745
4	0,53	0,34	1,202	1,202	1,531	1,506	3,834
5	0,53	0,27	1,202	1,202	1,508	1,529	9,208
6	0,53	0,25	1,202	1,202	1,512	1,519	9,990
7	0,53	0,21	1,202	1,202	1,539	1,486	3,388
8	0,53	0,21	1,202	1,202	1,492	1,499	9,104
9	0,53	0,15	1,202	1,202	1,518	1,537	4,965
11	0,53	0,17	1,202	1,202	1,494	1,612	7,513
12	0,53	0,2	1,202	1,202	1,487	1,579	6,928
						fx	71,200

Tabela 5. Provera koordinacije glavnih i rezervnih zaštita podešenih na klasičan način, IEC NI

CTI	1-3	3-5	3-7	3-9	4-2	5-11	5-12	6-4	6-7	6-9	8-4	8-5	8-9
k1z	0,31	0,30	0,30	0,30	0,33	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,29	0,29	0,29
k2z	0,29	0,31	0,31	0,31	0,30	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32	0,30	0,30	0,30

Tabela 6. Podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita dobijena MIHDE metodom, kriterijum 1

Pozicija releja	TD	PU	t (blizak k1z)	t (blizak k2z)	t (k1z na kraju voda)	t (k2z kvar na kraju voda)	t (k1z+100Ω na kraju voda)
1	0,62	0,24	1,509	1,508	1,879	1,846	5,059
2	0,47	0,46	1,079	1,066	1,514	1,512	3,137
3	0,64	0,22	1,451	1,451	1,626	1,634	6,790
4	0,53	0,35	1,202	1,202	1,551	1,525	3,954
5	0,59	0,22	1,338	1,338	1,543	1,564	6,773
6	0,66	0,15	1,496	1,496	1,544	1,550	5,199
7	0,5	0,25	1,134	1,134	1,571	1,512	3,816
8	0,61	0,19	1,383	1,383	1,647	1,655	8,397
9	0,52	0,16	1,179	1,179	1,531	1,552	5,339
11	0,55	0,15	1,247	1,247	1,472	1,582	6,206
12	0,55	0,18	1,247	1,247	1,478	1,565	5,996
						fx	60,665

Tabela 7. Provera koordinacije glavnih i rezervnih zaštita za rešenje dobijeno MIHDE metodom, kriterijum 1

CTI	1-3	3-5	3-7	3-9	4-2	5-11	5-12	6-4	6-7	6-9	8-4	8-5	8-9
k1z	0,43	0,29	0,49	0,45	0,47	0,30	0,30	0,34	0,41	0,36	0,45	0,31	0,47
k2z	0,40	0,30	0,50	0,45	0,46	0,32	0,32	0,35	0,42	0,37	0,45	0,32	0,48

Tabela 8. Podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita dobijena MIHDE metodom, kriterijum 2

Pozicija releja	TD	PU	t (blizak k1z)	t (blizak k2z)	t (k1z na kraju voda)	t (k2z kvar na kraju voda)	t (k1z+100Ω na kraju voda)
1	0,64	0,29	1,674	1,673	2,121	2,081	6,729
2	0,54	0,7	1,451	1,428	2,176	2,173	6,077
3	0,65	0,22	1,474	1,474	1,652	1,659	6,896
4	0,55	0,51	1,247	1,247	1,926	1,887	6,923
5	0,59	0,22	1,338	1,338	1,543	1,564	6,773
6	0,64	0,19	1,451	1,451	1,633	1,641	6,907
7	0,51	0,37	1,156	1,156	1,962	1,873	6,872
8	0,64	0,16	1,451	1,451	1,616	1,622	6,565
9	0,54	0,18	1,224	1,224	1,677	1,701	6,719
11	0,55	0,16	1,247	1,247	1,511	1,628	6,936
12	0,55	0,19	1,247	1,247	1,511	1,602	6,555
						fx	6,936

Tabela 9. Provera koordinacije glavnih i rezervnih zaštita za rešenje dobijeno MIHDE metodom, kriterijum 2

CTI	1-3	3-5	3-7	3-9	4-2	5-11	5-12	6-4	6-7	6-9	8-4	8-5	8-9
k1z	0,65	0,31	0,50	0,43	0,48	0,30	0,30	0,39	0,48	0,41	0,37	0,28	0,39
k2z	0,61	0,32	0,50	0,43	0,46	0,32	0,32	0,39	0,48	0,42	0,38	0,28	0,40

V ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen proračun podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita na delu 400 kV prenosne mreže, na osnovu dva pristupa. Prvi pristup je klasičan proračun podešavanja, dok je drugi pristup proračun podešavanja primenom unapređene metode diferencijalne evolucije. Na osnovu poređenja rezultata, zaključuje se da su podešenja dobijena primenom optimizacione metode svakako unapređena, međutim neophodno je naglasiti i da je klasični proračun neuporedivo jednostavniji u ovom slučaju i nema ograničenja po pitanju broja releja koji se razmatraju.

Prednost primene optimizacionih metoda bi svakako bila značajnija u delu mreže nižeg naponskog nivoa (110 kV i 220 kV), gde nije moguće na jednostavan način odrediti podešenja na klasičan način (dalekovodi su kraći, pa samim tim i odnos struja kvara na početku i na kraju dalekovoda je smanjen, što onemogućava jednostavnu primenu pomenutog pristupa). Takođe, bilo bi značajno ispitati primenu drugih optimizacionih metoda na istom problemu sa ciljem da se obuhvati efikasna optimizacija većeg broja nepoznatih parametara.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Urdaneta, A. J., Restrepo, H., Marquez, S., Sanchez, J. Coordination of

- directional overcurrent relay timing using linear programming, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 122-129, 1996.
- [2] Braga, A. S., Tome Saraiva, J. Coordination of overcurrent directional relays in meshed networks using the Simplex method, in Proc. *8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications (MELECON 96)*, Vol.3, pp. 1535-1538, 1996.
- [3] Noghabi, A. S., Sadeh, J., Mashhadi, H. R. Considering Different Network Topologies in Optimal Overcurrent Relay Coordination Using a Hybrid GA, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, pp. 1857-1863, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2029057>
- [4] Krstivojević, J., Šošić, D., Savić, A. Coordination of Directional Overcurrent Relays by Using Heuristic Optimization Method, in Proc. *10th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (Med Power 2016)*, pp. 1 - 8, Belgrade, Serbia, 2016. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1104>
- [5] Storn, R., Price, K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. Journal of Global Optimization, Vol 11, pp. 341–359, 1997.

AUTORI/AUTHORS

msr Miljana Todorović - master inženjer elektrotehnike i računarstva, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Saturn Electric d.o.o. Beograd, miljana.todorovic@saturnelectric-sr.com, ORCID [0000-0002-8821-4227](https://orcid.org/0000-0002-8821-4227)

dr Aleksandar Savić – vanredni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, savic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1176-0123](https://orcid.org/0000-0002-1176-0123)

Razmatranje gubitaka u niskonaponskim vodovima sa prikazom rezultata proračuna

Consideration of Losses in Low Voltage Lines with a Presentation of Calculation Results

Siniša Spremić, Dušan Obradović

Elektro distribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad

Rezime - Od ukupnih tehničkih gubitaka snage i gubitaka električne energije (u daljem tekstu: gubici) u distribuciji električne energije najveći deo otpada na tehničke gubitke u niskonaponskim vodovima. Tehnički gubici su gubici koji nastaju u distribuciji električne energije do potrošača u elektro distributivnoj opremi za razliku od komercijalnih gubitaka koji obuhvataju neovlašćeno korišćenje električne energije i gubitke zbog grešaka merne opreme. Najveći deo tih gubitaka je u niskonaponskim nadzemnim vodovima, posebno onim izvedenim neizolovanim provodnicima. Glavni izvor tehničkih gubitaka nastaje protokom električne struje kroz provodnike. Neuravnoteženost opterećenja može značajno da utiče na povećanje gubitaka. Određene mere su preduzimane u cilju smanjenja ovih gubitaka, ali ne sistematično. Dat je prikaz i razmatranje razlika tehničkih gubitaka snage za različite vrste opterećenja niskonaponskih vodova i za neuravnoteženost opterećenja. Proračun [1] je urađen u Microsoft Excel-u. Ulazni podaci se ubacuju ručno za svaki proračun. Proračuni pokazuju da se može se očekivati značajna ušteda na gubicima uz sprovođenje mera na uravnotežavanju opterećenja i pomeranjem opterećenja (potrošača) prema početku niskonaponskog nadzemnog izvoda, tj. pravilnim rasporedom potrošača. Ove mere treba da se sprovedu dugoročno i sistematično.

Ključne reči - Tehnički gubici, Niski napon, Nadzemni vod, Opterećenje, Neuravnoteženost

Abstract - The largest part of the total technical losses of power and of electric energy in the distribution of electricity are the technical losses of low voltage lines. Technical losses of electric energy are losses of electric energy that occur in the distribution of electric energy to consumers in electricity distribution equipment, as opposed to commercial losses that include unauthorized use of electricity and losses due to errors in metering equipment. Most of these losses are in low-voltage overhead lines, especially those made of non-insulated conductors. The main source of technical electricity losses is the flow of electric current through conductors. Load asymmetry can significantly increase electric energy losses. Certain measures have been taken to reduce these losses, but not systematically. The calculation of technical power losses for different types of loading of low voltage lines and for load asymmetry is presented

and considered. The calculation [1] was done in Microsoft Excel. Input data is entered manually for each calculation. Calculations show that significant savings on losses can be expected with the implementation of measures to balance the load and shift the load (consumer) towards the beginning of the low voltage line, i.e. proper distribution of consumers. These measures need to be implemented in the long term and systematically.

Index Terms - Technical losses, Low voltage, Overhead line, Load, Asymmetry

I UVOD

Već gotovo dve decenije se pokušava različitim merama uticati na smanjenje gubitaka električne energije (u daljem tekstu: gubitaka) u elektro distributivnoj mreži Srbije. Napravljeni su različiti programi koji vrše procenu tehničkih gubitaka u distributivnoj mreži. Na osnovu rezultata došlo se do zaključka da je u ukupnim gubicima veliki postotak netehničkih gubitaka. Zbog toga je glavni cilj bio da se eliminišu netehnički gubici kojima je izvor neovlašćeno korišćenje električne energije i gubici zbog grešaka merne opreme. Kontrole neovlašćenog korišćenja električne energije, baždarenje postojeće merne opreme i zamena merne opreme su uticale na smanjenje gubitaka, a u manjoj meri i ulaganje u nove distributivne objekte i rekonstrukciju postojećih distributivnih objekata.

Na području DP Novi Sad je 2010. godine preuzeta električna energija iznosila 8,712 GWh, a 2020. godine 8,307 GWh. Preuzeta električna energija se za 10 godina smanjila za 4,65 %. Dva Ogranka su imala povećanje preuzete električne energije. Ukupni gubici su 2010. godine iznosili 1,224 GWh ili 14,05 %, a 2020. godine 0,76 GWh ili 9,15 %. Smanjenje gubitaka za 10 godina iznosi 0,464 GWh ili za 37,9 %. Na smanjenje gubitaka u određenoj meri utiče i smanjenje protoka električne energije. Do smanjenja gubitaka je došlo i u Ograncima koji su imali povećanje preuzete električne energije, u jednom slučaju postotno smanjenje kao kod ukupnih gubitaka, a kod drugog za oko 21 %.

Cilj ovog rada je prikaz i razmatranje proračuna tehničkih gubitaka kod različitih rasporeda i opterećenja potrošača na niskonaponskom vodu i opis mogućnosti za smanjenje tehničkih gubitaka. Razmatraju se niskonaponski nadzemni vodovi sa

neizolovanim provodnicima izvedeni kao glavni vod bez ogranaka.

II PRETPOSTAVKE, ZANEMARENJA I OPIS MODELA PRORAČUNA

Pretpostavke za izradu modela proračuna su sledeće:

- napon na početku voda (0,4 kV sabirnice transformatorske stanice (u daljem tekstu: TS)) simetričan i po fazi i po veličini (iako se po želji mogu menjati i veličina i fazni pomak napona),
- razmatraju se samo ustaljeni režimi bez kvarova,
- struje čvorova (potrošača) koje se zadaju su sa faktorom snage (koji se takođe zadaje), tj. faznim uglom struje čvora (potrošača) u odnosu na početni napon na 0,4 kV sabirnicama TS x/0,4 kV. Time je stvarni fazni ugao između napona čvora (potrošača) i struje potrošača različit od zadanog i u proračunu se izračunava i prikazuje,
- neutralni provodnik je iste vrste provodnika i preseka kao fazni provodnici (što je stvarno stanje na najvećem delu mreže)
- podaci o radnom otporu i induktivnom otporu provodnika su korišćeni iz [2].

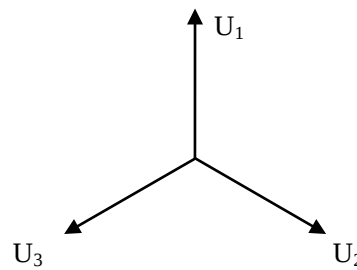
Zanemarenja koja su korišćena za pojednostavljenje modela proračuna:

- zanemaruju se kapacitivnosti vodova zbog malog uticaja na rezultat proračuna,
- zanemaruje se uticaj višestrukog uzemljenja neutralnog provodnika zbog malog uticaja na struju kroz neutralni provodnik u ustaljenom režimu bez kvara [3],
- ne razmatra se povećanje gubitaka usled povećanja temperature provodnika,
- kod nadzemnih vodova se zanemaruje uticaj na nesimetriju od faznog provodnika (posebno izvedenog) za javno osvetljenje koji je obično manjeg preseka od provodnika voda, a javno osvetljenje koristi nulti provodnik niskonaponskog izvoda.

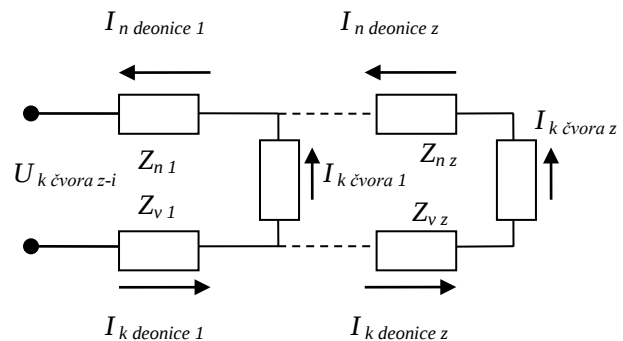
U modelu proračuna se za svaku deonicu voda zadaju šiframa podaci da li je deonica voda nadzemna ili podzemna i podaci o materijalu deonice voda. Za svaku deonicu se zadaju i podaci o preseku provodnika i dužini deonice. Za svaki čvor se u proračunu zadaju struja čvora (potrošača) i faktor snage čvora (struja čvora u odnosu na napon na 0,4 kV sabirnicama u TS x/0,4 kV) za svaku fazu posebno. Zadaju se takođe i podaci o veličini napona na 0,4 kV sabirnicama u TS x/0,4 kV za svaku fazu i za potrebe proračuna gubitaka zadaju se ekvivalentno vreme trajanja maksimalnog opterećenja $T_{\max}$ i ekvivalentno vreme trajanja gubitaka τ .

Proračun je urađen u Microsoft Excel-u, za 20 deonica sa mogućnošću proširenja po potrebi. Pored proračuna nesimetričnih režima mogu da se vrše i proračuni simetričnih režima. Za simetrične režime je proveren proračun sa [2] i dobijaju se isti rezultati.

Naponi su predstavljeni na sledeći način prema slici 1, a pojednostavljena šema za proračun po fazama je data na slici 2.



Slika 1. Prikaz fazora napona



Slika 2. Pojednostavljena šema za proračun sa injektiranjem struja u čvorove

$U_{k \text{ čvora } z-i}$ na slici 2 je u stvari početni napon, tj. napon sekundara transformatora.

Kada se zadaju potrebni podaci tok proračuna je sledeći. Iz zadatih struja i faktora snaga u čvorovima po fazama se izračunaju komponente po x-osi i po y-osi (opet napominjem da je u proračunu faktor snage čvora dat u odnosu struje čvora i napona na 0,4 kV sabirnicama TS x/0,4 kV) za svaku fazu posebno.

$$\vec{I}_{k \text{ čvora } i} = I_{k \text{ čvora } i x} + j \cdot I_{k \text{ čvora } i y} \quad (1)$$

U jednačini (1) i u jednačinama koje slede i je broj čvora ($i=0, \dots, z$), x označava komponentu struje po x-osi, y označava komponentu struje po y-osi, a k predstavlja svaku pojedinu fazu.

Struja koja se dobija u neutralnom vodu u čvoru i , se izračuna kao zbir struja pojedinih faza po komponentama x-ose i y-ose.

$$\vec{I}_{\text{čvora } n i} = \sum_{k=1}^3 I_{k \text{ čvora } i x} + j \cdot \sum_{k=1}^3 I_{k \text{ čvora } i y} \quad (2)$$

Proračun se nastavlja izračunavanjem struja deonica faza i to najpre za poslednju deonicu

$$\vec{I}_{k \text{ deonice } z} = \vec{I}_{k \text{ čvora } z}, \quad (3)$$

pa onda za prethodnu deonicu

$$\vec{I}_{k \text{ deonice } z-1} = \vec{I}_{k \text{ čvora } z} + \vec{I}_{k \text{ čvora } z-1}, \quad (4)$$

i tako dalje do prve deonice

$$\vec{I}_{k \text{ deonice } 1} = \sum_{i=1}^z \vec{I}_{k \text{ čvora } i} \quad (5)$$

Slično se izračunaju struje deonica neutralnog voda

$$\vec{I}_{n \text{ deonice } z} = \vec{I}_{n \text{ čvora } z} \quad (6)$$

$$\vec{I}_{n \text{ deonice } z-1} = \vec{I}_{n \text{ čvora } z} + \vec{I}_{n \text{ čvora } z-1} \quad (7)$$

$$\vec{I}_{n \text{ deonice } 1} = \sum_{i=1}^z \vec{I}_{n \text{ čvora } i} \quad (8)$$

Naponi čvorova (potrošača) se izračunavaju počev od čvora 1

$$\vec{U}_{k \text{ čvora } i} = \vec{U}_{k \text{ čvora } i-1} - \Delta \vec{U}_{k \text{ deonice } i} - \Delta \vec{U}_{n \text{ deonice } i} \quad (9)$$

gde su

$$\Delta \vec{U}_{k \text{ deonice } i} = \vec{I}_{k \text{ deonice } i} \cdot \vec{Z}_{\text{deonice } i} \quad (10)$$

$$\Delta \vec{U}_{n \text{ deonice } i} = \vec{I}_{n \text{ deonice } i} \cdot \vec{Z}_{\text{deonice } i} \quad (11)$$

a iz dobijenih vrednosti po x i y osi se dobijaju apsolutne vrednosti veličina (U i I , $\cos\varphi$) i onda izvedene veličine $\Delta U\%$, ΔP , P , $\Delta P\%$, W i drugo po potrebi.

III POMERANJE OPTEREĆENJA PREMA KRAJU IZVODA

U proračun [1] su ubačeni podaci o niskonaponskom nadzemnom vodu sa presekom provodnika od 50 mm^2 i za fazne i za neutralni provodnik što je još uvek najčešća vrsta niskonaponskog nadzemnog voda. Niskonaponski izvod se sastoji od 10 deonica dužine od po 40 m, ukupno 400 m sa sabirnicom i deset čvorova. Sagledavanjem potrošnje pojedinačnog domaćinstva procenjeno je da je prosečna potrošnja električne energije pojedinačnog potrošača iz kategorije domaćinstvo (uvećano za uticaj potrošača iz kategorije ostala potrošnja) oko 500 kWh mesečno odnosno 6000 kWh godišnje. Pretpostavka je da je na niskonaponskom izvodu u proseku 30 potrošača sa 3 niskonaponska izvoda po TS [4]. Pretpostavljeno maksimalno jednovremeno opterećenje pojedinačnog potrošača je oko 2,4 kW. Faktor snage je 0,95.

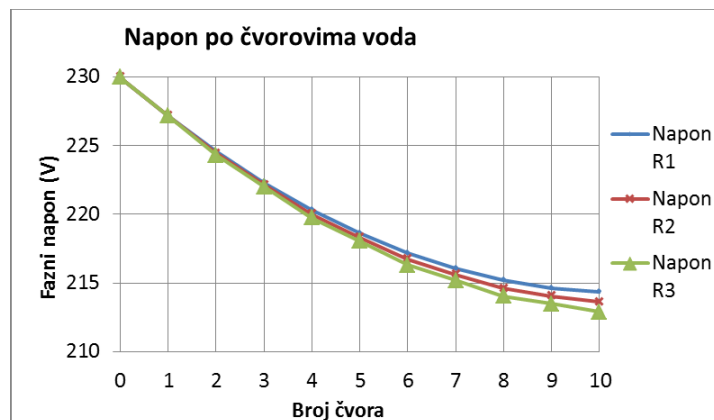
Tabela 1. Strujna opterećenja po čvorovima prema obrascima

	Redni broj čvora i opterećenje (A)					
Obrazac	1.	2.	3.	4.	5.	6.
R1	10	10	10	10	10	10
R2	5	15	5	15	5	15
R3	0	20	0	20	0	20

Prvi primer obrađuje slučaj uravnoteženog (simetričnog) opterećenja po fazama sa jednakim i u dva slučaja različitim opterećenjem po čvorovima. Pomeranje opterećenja prema kraju izvoda je prikazano u Tabeli 1 do šestog čvora, a isti obrazac se ponavlja do desetog čvora. Ovime se želi prikazati koliko se gubici povećavaju sa pomeranjem opterećenja prema kraju izvoda, tj. smanjenjem ukoliko bi pomeranje bilo prema početku izvoda. Ovakvo pomeranje opterećenja može da se pojavi u

niskonaponskom izvodu ukoliko se potrošači povezuju na najbliži stub i zbog promena u korišćenju električne snage potrošača. Rezultat promena u korišćenju električne snage potrošača je promena obrasca koji može biti sličan nekom od prikazanih u Tabeli 1, a mogu biti i nelinearni duž izvoda.

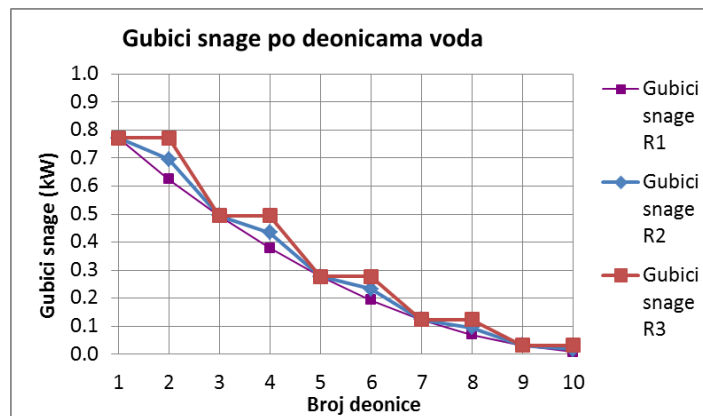
Na Slici 3 su prikazani fazni naponi za sva tri obrasca. Tačka 0 na apscisi označava početnu tačku tj. početak niskonaponskog izvoda u trafostanici sa početnim faznim naponom od 230 V.



Slika 3. Promena napona prema obrascima opterećenja

Za svaki obrazac su jednake vrednosti sva tri fazna napona. Razlike vrednosti napona obrazaca su male i tek na kraju niskonaponskog izvoda dolaze do vrednosti od oko 0,7 V.

Na Slici 4 su prikazani gubici snage po deonicama za sva tri obrasca za slučajeve pomeranja opterećenja prema kraju izvoda.



Slika 4. Gubici snage po deonicama

Sa Slike 4 se vidi da su zbog pomeranja opterećenja prema kraju voda gubici snage nešto povećani. Za obrazac R1 su gubici snage izvoda 2,971 kW (4,532 %), za obrazac R2 su 3,173 kW (4,841 %) i za obrazac R3 su 3,395 kW (5,179 %). Gubici snage se povećavaju za oko 0,2 kW kod obrazaca koji imaju lošiji raspored potrošača. Za obrazac R2 gubici su veći u odnosu na obrazac R1 za 6,8 %, a za obrazac R3 gubici su veći u odnosu na obrazac R1 za 14,3 %. Gubici snage od 0,2 kW ne izgledaju veliki. Uz pretpostavljeno vreme trajanja gubitaka od 1500 h dobijamo gubitke od 4456 kWh za obrazac R1, 4760 kWh za obrazac R2 i 5093 kWh za obrazac R3. Razlike između obrazaca su nešto veće od 300 kWh. Prema [5] u 2020. godini je bilo

3280254 potrošača iz kategorije domaćinstvo u elektrodistributivnom sistemu Srbije. Zanimarićemo potrošače iz kategorije ostala potrošnja kojih je 409181, a od kojih su većina na niskonaponskoj distributivnoj mreži. Pretpostavimo da se sa niskonaponske nadzemne mreže napaja oko 60 % potrošača iz kategorije domaćinstvo. To čini 1968152 potrošača. Ako taj broj podelimo sa 30 što je prosečan broj potrošača po niskonaponskom izvodu dobijamo 65605 niskonaponskih nadzemnih izvoda. Množeći 65605 niskonaponskih nadzemnih izvoda sa 300 kWh gubitaka između obrazaca R1 i R2 zbog pomeranja opterećenja prema kraju izvoda dobijemo uvećane gubitke od 19681524 kWh u odnosu na obrazac R1 koji ima uravnoteženo opterećenje po čvorovima.

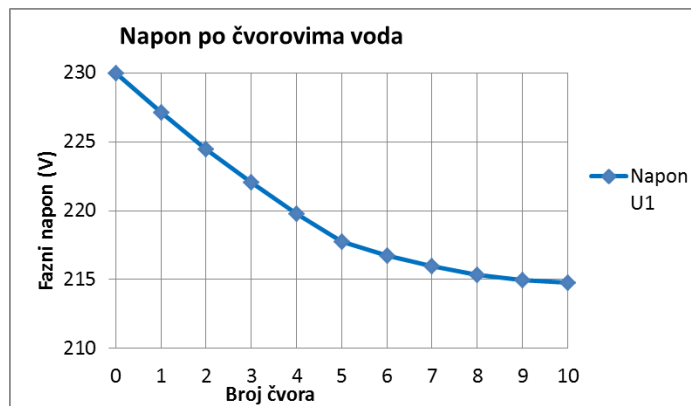
Dodatak drugog primera je slučaj da postoji ogranak na izvodu. U petom čvoru se nalazi ogranak iste dužine i opterećenja kao deo izvoda od petog čvora do kraja glavnog voda. Koristiće se obrazac R4 sa drugačijim vrednostima opterećenja po čvorovima, ali je ukupno opterećenje na početku voda jednako 100 A kao kod obrasca R1. U Tabeli 2 su prikazana opterećenja po čvorovima. Od 7. čvora do kraja opterećenje čvorova je 7 A.

Tabela 2. Strujna opterećenja po čvorovima prema obrascu R4

	Redni broj čvora i opterećenje (A) 6.					
Obrazac	1.	2.	3.	4.	5.	7
R4	7	7	7	7	37	

Ukupno opterećenje je isto, a ovo se može predstaviti kao drugačija brojnost i(ili) raspored potrošača po izvodu.

Na slici 5 je prikazan jedan od faznih napona. Sva tri fazna napona za obrazac R4 su jednaka.

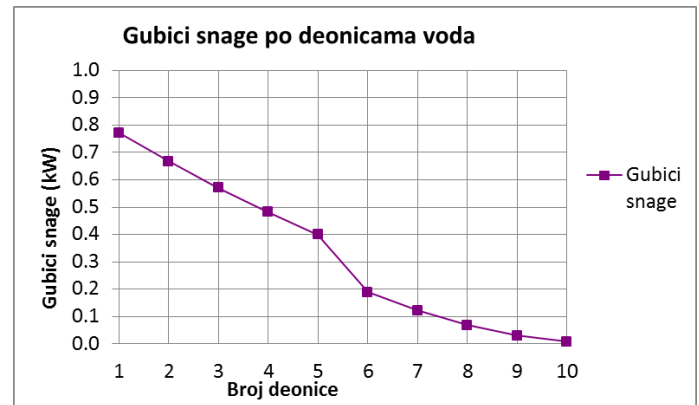


Slika 5. Promena napona prema obrascu opterećenja R4 za obrazac R4.

Za obrazac R4 naponi po čvorovima su približno jednaki onima iz obrasca R1, R2 i R3.

Poređenjem Slike 6 i Slike 4 vidi se da su u čvoru 1 isti gubici, povećani su gubici za obrazac R4 u odnosu na obrazac R1 za čvorove 2 do 5, a za čvorove 6 do 10 su približno jednaki. Za obrazac R4 su gubici snage izvoda 3,307 kW (5,029 %) u odnosu na obrazac R1 gde su gubici 2,971 kW (4,532 %). Ovo povećanje gubitaka je posledica pomeranja opterećenja prema kraju voda.

Često se u slučajevima velikog pada napona kod udaljenijih potrošača obično za opterećenje niskonaponske nadzemne izvode sa ograncima izvodi novi izvod samonosivim kablovskim snopom do prvog ili drugog ogranka. Veliki padovi napona kod potrošača često ukazuju i na velike gubitke.



Slika 6. Gubici snage po deonicama – obrazac R4

Na pomeranje opterećenja prema izvoru napajanja u slučaju navika u korišćenju električne snage potrošača se ne može uticati (izuzev upravljanjem potrošnjom ukoliko postoji) dok se na pomeranje opterećenja prema izvoru u cilju smanjenja gubitaka može uticati pravilnim rasporedom potrošača tako da se po mogućnosti povezuju na stub bliži izvoru napajanja iako bi priključak bio nešto duži. Ovo se može obaviti prilikom rekonstrukcija niskonaponske mreže, kod izgradnje nove niskonaponske mreže pravilnim planiranjem, u slučajevima planiranih isključenja zbog obavljanja remonta/revizije i kod zamene priključka potrošača. Ovi radovi bi se obavljali dugoročno kako bi se uz najmanja moguća ulaganja ostvarile uštede na gubicima. Dodatno bi se, uz poznat raspored potrošača na niskonaponskim nadzemnim vodovima, njihovu potrošnju električne energije, merenjima opterećenja na izvodima, presekcijom niskonaponskih izvoda moglo uticati na uštede u gubicima.

IV POMERANJE OPTEREĆENJA PREMA KRAJU IZVODA I NEURAVNOTEŽENOST OPTEREĆENJA

Drugi primer obrađuje amplitudnu neuravnoteženost opterećenja uključivo pomeranje opterećenja prema kraju izvoda. S obzirom na relativno mali uticaj neuravnoteženosti faktora snage [6] isti se ovde neće razmatrati. Ovime se želi prikazati koliko se gubici povećavaju sa pomeranjem opterećenja prema kraju izvoda, tj. smanjenjem ukoliko bi pomeranje bilo prema početku izvoda.

Moguće je da svi niskonaponski izvodi iz jedne TS imaju značajnu neuravnoteženost, a da merenje na sabirnicama (ili na ampermetrima sa pokazivačem petnaestominutnog maksimuma) ne pokazuje nesimetriju opterećenja ili je ona veoma mala. Takođe je moguće da pojedine deonice imaju značajnu neuravnoteženost koja se duž voda "ispegla" tako da na početku niskonaponskog izvoda nema značajnije nesimetrije. Opterećenje i nesimetrija se menjaju vremenom [7-10]. Nesimetrija u niskonaponskim vodovima se u manjoj meri prenosi na srednji

napon zbog odgovarajuće sprege distributivnih transformatora $x/0,4 \text{ kV}$ [7, 11].

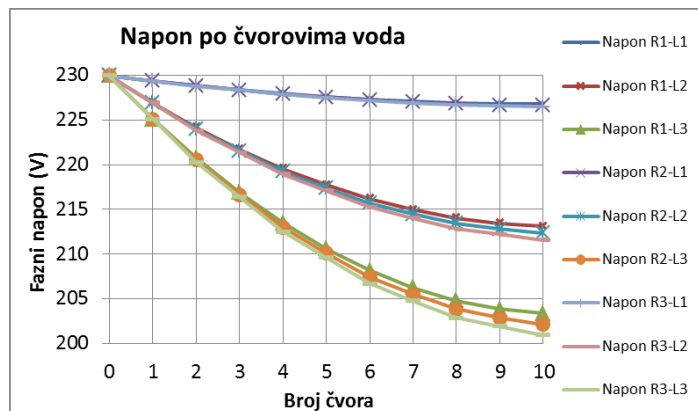
Koriste se prethodno prikazani obrasci R1, R2 i R3 gde su sada za svakog dati primeri promene opterećenja po fazama L1, L2 i L3. Različiti prikazi dijagrama neuravnoteženosti [7-10] na sabirnicama transformatora ili na niskonaponskim izvodima pokazuju da se odstupanje u najvećem delu vremena kreće od $\pm 20 \%$ do $\pm 30 \%$ od srednje vrednosti struje. U proračun su ubačeni podaci o tipu neuravnoteženosti gde je struja srednje faze jednaka srednjoj vrednosti struja sve tri faze, a dve krajnje faze odstupaju od srednje vrednosti za -30% i za $+30 \%$ što je realan primer neuravnoteženosti na niskonaponskom izvodu. Neuravnoteženost opterećenja na niskonaponskim izvodima može biti veća od ove uzete u proračun, ali i manja.

Pomeranje opterećenja i neuravnoteženosti opterećenja prema kraju izvoda je prikazano u Tabeli 3 do šestog čvora, a isti obrazac se ponavlja do desetog čvora.

Tabela 3. Strujna opterećenja po čvorovima prema obrascima i fazama

Obrazac	Redni broj čvora i opterećenje (A)					
	1.	2.	3.	4.	5.	6.
R1-L1	7	7	7	7	7	7
R1-L2	10	10	10	10	10	10
R1-L3	13	13	13	13	13	13
R2-L1	3,5	10,5	3,5	10,5	3,5	10,5
R2-L2	5	15	5	15	5	15
R2-L3	6,5	19,5	6,5	19,5	6,5	19,5
R3-L1	0	14	0	14	0	14
R3-L2	0	20	0	20	0	20
R3-L3	0	26	0	26	0	26

Na Slici 7 su prikazani fazni naponi za sva tri obrasca iz Tabele 3. Tačka 0 na apscisi označava početnu tačku tj. početak niskonaponskog izvoda u trafostanici sa početnim faznim naponom od 230 V.



Slika 7. Promena napona prema obrascima opterećenja i fazama

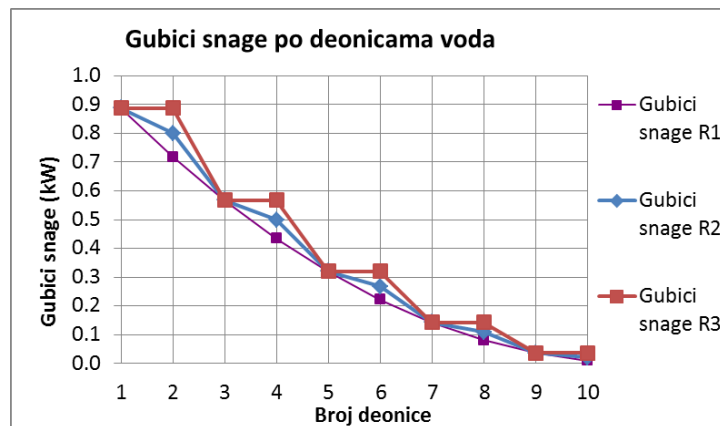
U odnosu na Sliku 3 gde je u proračunu primenjeno pomeranje opterećenja na Slici 7 se može se uočiti da su naponi u fazi koja je opterećenija značajno niži i to nešto više od 10 V. U srednjoj fazi naponi su približno jednaki onima sa Slike 3. U najmanje

opterećenoj fazi je pad napona mali. Razlike između napona po fazama su male, slično kao na Slici 1.

Neuravnoteženost opterećenja značajno utiče na neuravnoteženost napona, može da dovede do toga da vrednost napona izlazi iz granica određenih standardom.

Na Slici 8 su prikazani gubici snage po deonicama za sva tri obrasca za slučajeve pomeranja opterećenja prema kraju izvoda i za neuravnoteženost opterećenja.

Sa Slike 8 se vidi da su zbog neuravnoteženosti gubici snage nešto povećani u odnosu na Sliku 4 gde je uticaj imalo samo pomeranje opterećenja prema kraju izvoda.



Slika 8. Gubici snage po deonicama

Za obrazac R1 su gubici snage izvoda 3,416 kW (5,233 %) u odnosu na 2,971 kW (4,532 %) iz prvog primera, za obrazac R2 su 3,649 kW (5,591 %) u odnosu na 3,173 kW (4,841 %) i za obrazac R3 su 3,904 kW (5,984 %) u odnosu na 3,395 kW (5,179 %). Gubici snage se povećavaju za 0,45 kW do 0,5 kW u odnosu na obrasce samo sa pomeranjem opterećenja prema kraju izvoda. Za obrasce R1, R2 i R3 sa neuravnoteženošću opterećenja (drugi primer) gubici su respektivno veći u odnosu na obrasce R1, R2 i R3 bez neuravnoteženosti opterećenja (prvi primer) za oko 15 %. Ako uzmemo obrazac R2 kao reprezentativan za pomeranje opterećenja prema kraju izvoda i neuravnoteženosti opterećenja možemo proceniti gubitke električne energije u niskonaponskoj nadzemnoj mreži. Razlika gubitaka snage obrasca R2 iz drugog primera i obrasca R1 iz prvog primera je 0,678 kW što uz vreme trajanja gubitaka od 1500 h daje 1017 kWh godišnjih gubitaka po niskonaponskom nadzemnom izvodu. Množeći 1017 kWh sa brojem od 65605 niskonaponskih nadzemnih izvoda dobija se uvećanje gubitaka električne energije za 66720285 kWh u niskonaponskim nadzemnim vodovima u elektrodistributivnoj mreži Srbije usled pomeranja potrošnje prema kraju izvoda i zbog neuravnoteženosti opterećenja. Neuravnoteženost opterećenja dovodi do pojave struje u neutralnomvodu i značajno utiče na povećanje gubitaka.

Od ukupnog broja potrošača veliki broj je monofazni (po proceni oko 50 %), dok je na pojedinim TS većina potrošača monofazna. Ukoliko merenje pokaže neuravnoteženost opterećenja potrebno je snimanje broja i rasporeda monofaznih potrošača, te u slučaju neravnomernog rasporeda potrošača ravnomerno raspoređivanje može da da rezultat u smanjenju neuravnoteženosti opterećenja,

gubitaka i ujednačavanja faznih napona kod potrošača. Uočeno je da kod vertikalnog rasporeda više monofaznih potrošača ima priključak na najnižoj fazi nego na nekoj od preostale dve.

Ukoliko neuravnoteženost opterećenja postoji kod izvoda gde su monofazni potrošači ravnomerno raspoređeni ili ih nema, jedina mogućnost je da se kod jednog dela postojećih trofaznih potrošača (bez obzira da li su u pitanju kolektivni stambeni objekti ili individualni) pokuša sa zamenom faznih priključaka ("rotacijom") na mestu priključenja na stubu ili kablovskoj priključnoj kutiji ili na mernom mestu potrošača. Ovde se mora paziti da se pravilno izvrši zamena kako kod trofaznih obrtnih mašina i drugih uređaja izbegao suprotan smer obrtanja ili nepravilan rad koji može da dovede do oštećenja uređaja.

V ZAKLJUČAK

Razmatranje povećanja gubitaka usled pomeranja opterećenja prema kraju izvoda i usled neuravnoteženosti opterećenja je neophodno uz odgovarajuće proračune koji ukazuju da se određenim merama može uticati da se gubici smanje.

Mere na smanjenju gubitaka usled neuravnoteženosti opterećenja i mere na pomeranju opterećenja prema izvoru napajanja nisu mere koje se mogu izvršiti u kratkom vremenskom roku. Neophodno je da se osmisli postupak kojim bi se dugoročno rešavao problem neuravnoteženosti opterećenja i time povezanih gubitaka, kao i pomeranje opterećenja prema izvoru napajanja. Dugoročno se mogu ostvariti značajne uštede na smanjenju gubitaka.

Procena je da se dugoročnim merama na pomeranju opterećenja prema izvoru napajanja prema prikazanim proračunima, tj. početku niskonaponskog izvoda mogu smanjiti gubici za oko 5%. Pomeranje opterećenja prema izvoru napajanja zajedno sa uravnotežavanjem opterećenja mogu smanjiti gubitke za oko 15%. U nekim slučajevima smanjenje gubitaka može bi i veće i manje.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Spremić, S. Analiza povećanja gubitaka usled nesimetrije opterećenja u niskonaponskoj distributivnoj mreži i mogući načini za analizu i smanjenje gubitaka usled nesimetrije opterećenja, *Elektrodistribucija*, br. 2-3, str. 58-65, 2006.
- [2] J.P. Elektrovojvodina, Paket računarskih programa za izračunavanje gubitaka u elementima mreže, J.P. Elektrovojvodina, 1992.
- [3] Ćirić, R., Ochoa, L.F., Feltrin, A.P., Nouri, H. Analiza kvarova u četverožičnim distributivnim mrežama, *Elektrodistribucija*, br. 1, str. 34-42, 2006.
- [4] Spremić, S. Tehnoekonomska analiza za smanjenje gubitaka u nadzemnim vodovima distributivne mreže minimalnim ulaganjem u povećanje preseka provodnika, *Elektrodistribucija*, br. 1, str. 50-56, 2004.
- [5] *Elektrodistribucija Srbije*, [GI_2020.pdf \(epsdistribucija.rs\)](#) [pristupljeno 14.03.2022.]
- [6] Spremić, S. Analiza uticaja nesimetrije faktora snage po fazama u niskonaponskoj distributivnoj mreži, *Elektrodistribucija*, 2011.
- [7] Švenda, G., Kojić, S. Kvantifikacija nesimetrije u srednjenaponskim i niskonaponskim distributivnim mrežama, in *Proc. I jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama*, Zlatibor, 1998.
- [8] Jović, A., Stojanović, D. Merenje prisustva trećeg harmonika u struji neutralnog provodnika u niskonaponskoj distributivnoj mreži, in *Proc. VI savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem*, Vrnjačka Banja, 2008.
- [9] Stojanović, D., Korunović, L., Jović, A. Merenje i analiza nesimetrije opterećenja u niskonaponskoj distributivnoj mreži, in *Proc. VI savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem*, Vrnjačka Banja, 2008.
- [10] Beharrysingh, S. *Phase unbalance on low-voltage electricity networks and its mitigation using static balancers*, A Doctoral Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of the degree of Doctor of Philosophy (PhD), at Loughborough University. 31st March, 2014.
- [11] Mitraković, B. *Transformatori*, Beograd: Naučna knjiga, 1979.

AUTORI/AUTHORS

Siniša Spremić - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad, sinisa.spremic@ods.rs, ORCID [0000-0003-3669-3999](#)

Dušan Obradović - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad, dusan.obradovic@ods.rs, ORCID [0000-0001-6332-2515](#)

Analiza uticaja aktivnih delova energetskog transformatora na prostiranje signala od izvora parcijalnih pražnjenja ka UHF davačima

Analysis of the Influence of Active Parts of the Power Transformer on the Propagation of Signals from Source of Partial Discharges to UHF Sensors

Đorđe Dukanac

Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd

Rezime - Parcijalna pražnjenja uzrokovana početnim slabostima u izolacionom sistemu energetskog transformatora ne mogu potpuno da se zanemare, jer mogu unapred da upozore na moguće ozbiljne nedostatke, koji bi u najgorim slučajevima mogli da uzrokuju nepovratni kvar energetskog transformatora. Nadziranjem signala parcijalnih pražnjenja primenom UHF davača pri radu energetskog transformatora u pogonu omogućuje se njihova obrada u cilju utvrđivanja glavnih osobina snimljenih signala parcijalnih pražnjenja (npr. visine amplitude, učestalosti ponavljanja, frekventnog opsega) radi predupređenja kvara energetskog transformatora. Pomoću simulacija u ANSYS HFSS-u, u ovom radu se istražuju talasni oblici i kašnjenja UHF elektromagnetskih signala na UHF davačima montiranim na različitim mestima suda malog energetskog transformatora. Elektromagnetski talasi se odašilju od strane posebno oblikovanog modela izvora parcijalnih pražnjenja u izolaciji energetskog transformatora. Više se puno-talasne elektromagnetske simulacije na modelu malog energetskog transformatora konstrukcije tipa jezgra. Uračunava se dejstvo odbijanja elektromagnetskih UHF talasa od zidova suda, zatim skretanje talasa oko i odbijanje talasa od elemenata trofaznog magnetnog jezgra i trofaznih primarnih i sekundarnih namotaja. Simulacija se zasniva na metodi konačnih elemenata. To je numerička metoda koja se primenjuje na diferencijalne jednačine sa graničnim vrednostima radi dobijanja približnog rešenja. Izvor i prijemni davači u računarskoj simulaciji oblikovani su predajnom i prijemnim UHF antenama, respektivno. Biće opisane prednosti i mane ove računarske simulacije.

Ključne reči - energetski transformator, parcijalna pražnjenja, prostiranje signala, UHF davač, UHF signal

Abstract - Partial discharges caused by initial weaknesses in the insulation system of the power transformer cannot be completely ignored, because they can warn in advance of possible serious deficiencies, which in the worst cases could cause irreversible failure of the power transformer. Monitoring of partial discharge signals using UHF sensors during power transformer operation enables their processing in order to determine the main properties

of recorded partial discharge signals (e.g. amplitude, repetition rate, frequency range) to prevent power transformer failure. Using simulations in ANSYS HFSS, this paper investigates the waveforms and delays of UHF electromagnetic signals on UHF sensors mounted at different locations of a small power transformer tank. Electromagnetic waves are emitted by a specially designed model of the source of partial discharges in the insulation of the power transformer. Full-wave electromagnetic simulations are performed on the model of a small power transformer of core construction. The effect of reflections of electromagnetic UHF waves from the walls of the tank is taken into account, then the diffractions of waves around and the reflections of waves from the elements of the three-phase magnetic core and three-phase primary and secondary windings. The simulation is based on finite element method. It is a numerical method that is applied to differential equations with limit values in order to obtain an approximate solution. The source and receiver sensors in the computer simulation are designed with transmitting and receiving UHF antennas, respectively. The advantages and disadvantages of this computer simulation will be described.

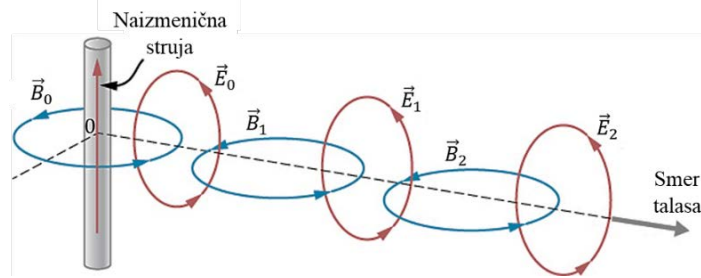
Index Terms - Power transformer, Partial discharges, Signal propagation, UHF sensor, UHF signal

I UVOD

Najbitnije tumačenje Maksvelovih jednačina jeste da je njima zadato da se elektromagnetski talasi prostiru u odsustvu bilo kakvih naelektrisanja ili struja. Bolje rečeno, u početku neka vremenski zavisna naelektrisanja ili struje bi mogle da budu potrebne da se stvori elektromagnetski talas, ali jednom stvoren on nastavlja da se prostire sve dalje i dalje bez bilo kakvih dodatnih naelektrisanja ili struja. Na slici 1. prikazan je proces prostiranja unakrsno povezanog električnog i magnetskog polja koje predstavlja prostiranje elektromagnetskog talasa kroz prostor od strujnog izvora.

Otkrivanje parcijalnog pražnjenja pronalaženjem oslobođene energije u obliku elektromagnetskog talasa tokom parcijalnih

pražnjenja korišćenjem antene za ultra visoke učestanosti (UHF antene) jedan je od metoda za određivanje visine kvaliteta izolacionog sistema elektroenergetskih aparata [1,2].



Slika 1. - Prostiranje promena električnog $\vec{E}$ i magnetskog $\vec{B}$ polja kroz prostor od strujnog izvora.

Glavna prednost UHF sistema za otkrivanje parcijalnih pražnjenja pomoću antene je mogućnost pronalaženja signala parcijalnih pražnjenja bez prethodnog isključivanja elektroenergetskog aparata [3]. Prema tome, potreban je sistem merenja parcijalnih pražnjenja koji se zasniva na elektromagnetskom talasu koji je izazvan parcijalnim pražnjenjem i otkriven UHF davačem.

Za linearni, izotropni i homogeni dielektrik talasne jednačine za tačkasti izvor sfernih talasa su:

$$\frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{1}{r} \cdot \nabla^2 \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \frac{1}{r} \cdot \nabla^2 \vec{B} = 0 \quad (2)$$

gde su:

$\vec{E}$ - vektor električnog polja,

$\vec{B}$ - vektor magnetskog polja,

v - fazna brzina talasa,

r - rastojanje od tačkastog izvora,

t - vreme.

Za faznu brzinu talasa u materijalima sa relativnom permitivnošću ϵ_r i relativnom permeabilnošću μ_r , dobija se:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (3)$$

gde je c - brzina prostiranja elektromagnetskog talasa u vakuumu.

II PROSTIRANJE ELEKTROMAGNETSKOG TALASA U DIELEKTRIČNOJ SREDINI I PARCIJALNA PRAŽNJENJA

Dielektrik sa gubicima može da se objasni kao sredina gde se neki deo snage elektromagnetskog talasa gubi kako se talas prostire. Ovaj gubitak snage potiče zbog loše provodljivosti.

Dielektrik sa gubicima može da se opiše parametrima provodljivosti $\sigma \neq 0$, permeabilnosti μ i permitivnosti ϵ .

Konstanta slabljenja (α) je mera prostorne brzine opadanja elektromagnetskog talasa u datoj sredini, merena u decibelima po metru (dB/m). U pogledu osobina dielektričnih materijala, konstanta slabljenja može da se zada kao:

$$\alpha = \omega \frac{\mu \epsilon}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + \left[\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right]^2} - 1 \right] \quad (4)$$

gde je ω - kružna učestanost.

Može da se pokaže da kako se talas prostire kroz dielektrik sa gubicima duž z-pravca, amplituda (električnog i magnetskog polja) talasa je oslabljena sa činiocem $e^{-\alpha z}$ i zato se α naziva konstanta slabljenja, ili faktor slabljenja sredine.

Visokonaponska izolacija je najvažniji deo opreme visokog napona koja se koristi u elektroenergetskom sistemu. Glavni zadatak električne izolacije je da izdrži veliko električno polje između faza ili faze i neutralnog provodnika. Pri preterano velikom električnom polju zbog pojave mesta sa pojačanim poljem kao što je šupljina ispunjena gasom ili metalno izbočenje, mogu da se jave parcijalna pražnjenja.

Pojava parcijalnih pražnjenja u električnoj izolaciji može da ukaže na starenje izolacije i dugoročno to može dodatno da smanjuje potpunost izolacije što dovodi do kvara opreme [4]. Pronalaženje parcijalnih pražnjenja u ranoj fazi potrebno je da se spreči kvar opreme visokog napona.

Kada postoje parcijalna pražnjenja, elektromagnetski talasi se emituju radialno iz izvora parcijalnih pražnjenja i UHF davači su u stanju da ih adekvatno prime. Prostiranje UHF signala predstavlja veoma brz proces.

U odnosu na vakuum, brzina talasa opada prema jednačini (3). Brzina UHF elektromagnetskih talasa parcijalnih pražnjenja u mineralnom ulju sa dielektričnom permitivnošću 2,2 je $20,23 \frac{cm}{ns}$.

III OSOBINE PROSTIRANJA UHF TALASA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA U ENERGETSKOM TRANSFORMATORU

Energetski aparat je uglavnom u obliku metalom oklopljene opreme. Oslobođene energije iz parcijalnih pražnjenja, kao što su svetlost, toplota i elektromagnetski talas, onemogućene su da prođu kroz metalno kućište, tako da moraju da se pronalaze unutrašnjim davačem.

Na snimljeni signal na UHF davaču utiče sledeće:

- Poseban tip, jačina i položaj izvora parcijalnih pražnjenja;
- Frekvencijski odziv, mesto ugradnje, osetljivost i dijagram odavanja i prijema zračenja UHF davača;
- Odgovarajući put prostiranja UHF talasa između izvora parcijalnih pražnjenja i UHF davača, koji je obično određen unutrašnjom strukturom energetskog transformatora;
- Osetljivost mernog uređaja.

Energetski transformator se sastoji od različitih materijala koji mogu da budu:

- 1) dielektrični (npr. mineralno ulje, uljno-papirna izolacija, prešpan),
- 2) elektroprovodni (npr. bakar) i
- 3) meki magnetni (npr. električni čelik).

Aktivni delovi energetskog transformatora mogu da utiču na oblik i veličinu primljenih signala na UHF davačima čije je izvor parcijalno pražnjenje u izolaciji energetskog transformatora. Pri tome je slabljenje i izobličenje utoliko veće ukoliko je putanja signala parcijalnih pražnjenja više izobličena u odnosu na pravu liniju koja spaja izvor i odgovarajući UHF davač.

Slabljenje signala potiče od gubitka energije signala prilikom odbijanja od metalnih aktivnih delova transformatorskog jezgra i namotaja visokog i niskog napona. Pri svakom nailasku na bilo kakvu metalnu prepreku deo signala će da se odbije, a ostali deo će da nastavi prostriranje difrakcijom (skretanjem) talasa oko prepreka.

Da je u ovom radu u simulaciji uzeta u obzir i uljno-papirna izolacija namotaja visokog i niskog napona i međuizolacija od prešpana javilo bi se i neko dodatno slabljenje i prelamanje na granicama ulje - papirno-uljna izolacija i papirno-uljna izolacija - ulje ili ulje - prešpan i prešpan - ulje.

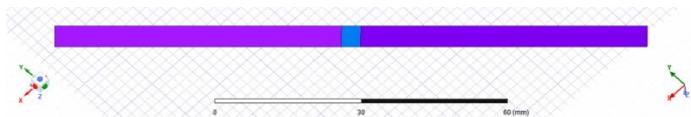
Iako UHF izvor parcijalnih pražnjenja zrači energiju u skoro svim pravcima, neki deo fronta elektromagnetskog talasa će da prati najkraći, najneposredniji put između izvora parcijalnih pražnjenja i prijemne UHF antene. Pošto ulje i papir imaju skoro iste dielektrične parametre, posebno permitivnost, kombinacija ulja i papira jedva da utiče na prostiranje UHF talasa. Zbog umereno oslabljenog prostiranja UHF talasa u sudu transformatora, otkrivanje elektromagnetskih talasa je veoma osetljivo [5].

Na slabljenje UHF signala u energetskom transformatoru uglavnom utiče rastojanje između UHF izvora i UHF davača. Slabljenje UHF signala zasnovano na rastojanju ima male promene, između (0,5 - 2,5) dB/m [6]. Može da se pretpostavi prosečno slabljenje UHF signala po metru od 2 dB/m [6,7].

Pored toga, signali se višestruko odbijaju od zidova suda i aktivnih delova transformatora dok se njihova energija ne potroši. Zato je razumevanje osobina prostiranja signala u transformatorima ključno za poboljšanje tačnosti određivanja mesta izvora parcijalnih pražnjenja [8]. Refleksije mogu da izobliče (smanje) prve vrhove signala i to utoliko pre ukoliko su metalni delovi transformatora bliži predajnoj anteni.

IV MODEL PREDAJNIKA I PRIJEMNIKA

Na slici 2. predstavljena je dipolna UHF antenna korišćena u računarskoj simulaciji u HFSS-u za izvor parcijalnih pražnjenja i davače UHF signala. Kraci ove UHF antene su dimenzija 60 mm x 5 mm i izrađeni su od bakra.

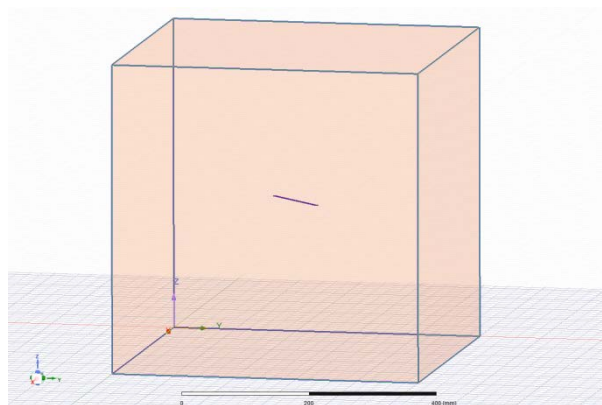


Slika 2. Dvopolna UHF antenna dimenzija 124 mm x 5 mm

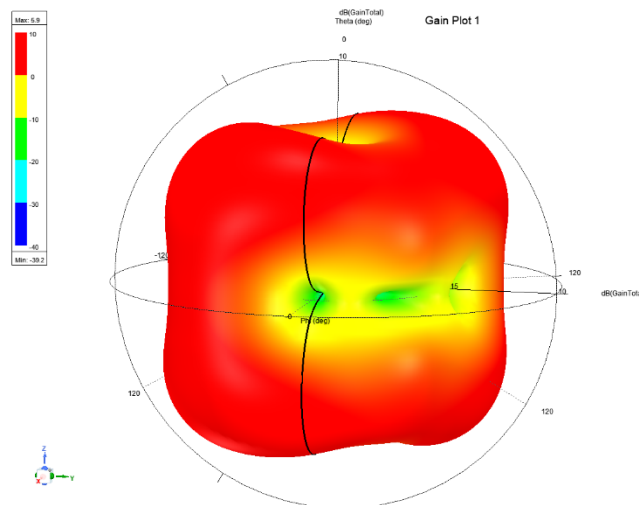
Na slici 3. prikazana je razmatrana dvopolna UHF antenna čije je zračenje ograničeno kockom stranica dužine 500 mm radi ispitivanja ukupnog dobitka antene. Dvopolna UHF antenna je u položaju [250 250 250] mm, za 45° okrenuta u xy-ravni u odnosu na y-osu u smeru kazaljke na satu.

Na slici 4 prikazan je polarni dijagram ukupnog dobitka dvopolne UHF antene, izražen u decibelima [dB] pri učestanosti 1 GHz, za položaj UHF antene na slici 3.

Sa slike 4. vidi se da dipolna antena ne zrači podjednako snagom zračenja u svim pravcima.



Slika 3. - Dvopolna UHF antena čije je zračenje ograničeno kockom stranica dužine 500 mm radi ispitivanja ukupnog dobitka UHF antene.



Slika 4. Polarni dijagram ukupnog dobitka UHF antene, izražen u decibelima [dB], za položaj dipolne UHF antene na slici 3.

V OPIS KORIŠĆENIH MODELA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Razmatra se model malog trofaznog energetskog transformatora naznačene prividne snage 5 MVA i prenosnog odnosa 66/11 kV. Dužina transformatorskog suda je 2300 mm, širina 880 mm, a visina 2800 mm.

Radi poređenja i analize uticaja stvarne konstrukcije energetskog transformatora posmatraće se primeri prostiranja UHF signala od izvora parcijalnih pražnjenja (predajne dvopolne UHF antene) do četiri prijemne dvopolne UHF antene za sledeće modele energetskog transformatora korišćene u simulaciji:

- 1) za prazan transformatorski sud izrađen od nerđajućeg čelika 304 debljine 8 mm i ispunjen transformatorskim mineralnim uljem;

- 2) za transformatorski sud izrađen od nerđajućeg čelika 304 ispunjen transformatorskim mineralnim uljem u kome se nalazi trostubno četvorostepeno magnetno jezgro transformatora izrađeno od električnog čelika;
- 3) za jednu tipičnu konstrukciju energetskog transformatora koga čine:
 - transformatorski sud izrađen od nerđajućeg čelika 304;
 - transformatorsko izolaciono mineralno ulje;
 - trostubno četvorostepeno (sa 7 stupnjeva) jezgro energetskog transformatora izrađeno od električnog čelika;
 - trofazni bakarni transformatorski namotaji niskog i visokog napona.

Usvojeni položaji (središnjih tačaka) prijemnih antena su sledeći:

$$D_1 [65; 65; 2750] \text{ mm}, D_2 [1150; 440; 2758] \text{ mm},$$

$$D_3 [2235; 815; 2755] \text{ mm}, D_4 [70; 810; 2760] \text{ mm}.$$

Zbog ograničenih mogućnosti programa ANSYS Electronics Desktop HFSS (high-frequency structure simulator) i računara (procesora i radne memorije), trofazni visokonaponski i niskonaponski namotaji morali su da budu uprošćeni.

Izolacija trofaznih namotaja je zanemarena i približno se smatra kao da je sa dielektričnom čvrstoćom ulja jer je sva papirna izolacija namotaja impregnisana uljem, čime se dielektrična čvrstoća izolacije smanjuje. Međuizolacija između namotaja višeg i nižeg napona zanemaruje se i smatra se kao da je sa dielektričnom čvrstoćom ulja jer su slojevi prešpanske izolacije takođe impregnisani uljem, čime se dielektrična čvrstoća prešpana smanjuje.

Namotaji niskog napona (NN) i visokog napona (VN) izrađeni su od po 42 diska odgovarajućih veličina. Međuizolacija između susednih 10 navojaka diskova NN i 15 navojaka diskova VN po radialnom pravcu, debljine 1,2 mm, nije uzeta u obzir tj. smatra se bakrom. Svaki disk visokog napona podeljen je na dva dela po uspravnoj osi sa razmakom 1,2 mm, mada bi trebalo da ima 4 dela.

Pretpostavljeno je da je izvor parcijalnih pražnjenja postavljen u tački: $I = [893,5 \ 435 \ 1118] \text{ mm}$. Nalazi se sa desne prednje strane srednjeg stuba jezgra, u srednjem delu 2. faze namotaja. Postavljen je između namotaja NN i VN, bliže namotaju NN, i to naspram 22. diska namotaja NN i naspram donjeg dela 22. diska namotaja VN. Najveće moguće rastojanje u sudu je 3728,86 mm, čemu odgovara kašnjenje elektromagnetskog talasa od 18,644 ns. Rastojanja između UHF izvora i UHF davača obično su kraća.

Izvor parcijalnih pražnjenja je širokopojasni impuls najmanje učestanosti 0 Hz a najveće učestanosti 1 GHz, amplituda 1 V.

Da bi se odredilo mesto izvora parcijalnih pražnjenja [9], neophodno je da se koristi raspodeljeni niz od tri ili više UHF davača radi istovremenog prijema signala parcijalnih pražnjenja i omogućavanja triangulacije. Snimljeni UHF signali sa UHF davača mogu da se obrade za određivanje vremenskih razlika dolaska signala između njih. Mesto izvora parcijalnih

pražnjenja tada može da se određuje iz tih vremenskih razlika pristizanja signala između davača [10,11].

Za četiri UHF davača mogu da se napišu sledeće četiri jednačine sa četiri nepoznate promenljive:

$$v_u \cdot T_1 = \sqrt{(x_I - x_1)^2 + (y_I - y_1)^2 + (z_I - z_1)^2} \quad (5)$$

$$v_u \cdot (T_1 + t_{21}) = \sqrt{(x_I - x_2)^2 + (y_I - y_2)^2 + (z_I - z_2)^2} \quad (6)$$

$$v_u \cdot (T_1 + t_{31}) = \sqrt{(x_I - x_3)^2 + (y_I - y_3)^2 + (z_I - z_3)^2} \quad (7)$$

$$v_u \cdot (T_1 + t_{41}) = \sqrt{(x_I - x_4)^2 + (y_I - y_4)^2 + (z_I - z_4)^2} \quad (8)$$

gde su:

$v_u = 20,23 \frac{\text{cm}}{\text{ns}}$ – brzina UHF signala u mineralnom ulju,

x_I, y_I, z_I – koordinate izvora I parcijalnih pražnjenja,

x_k, y_k, z_k – koordinate UHF davača k ($k = 1, 2, 3, 4$),

T_1 – vreme prispeća signala parcijalnih pražnjenja od izvora I do referentnog davača D_1 ,

t_{21} – razlika između signala u vremenima pristizanja od izvora I do davača D_2 i referentnog davača D_1 ,

t_{31} – razlika između signala u vremenima pristizanja od izvora I do davača D_3 i referentnog davača D_1 ,

t_{41} – razlika između signala u vremenima pristizanja od izvora I do davača D_4 i referentnog davača D_1 .

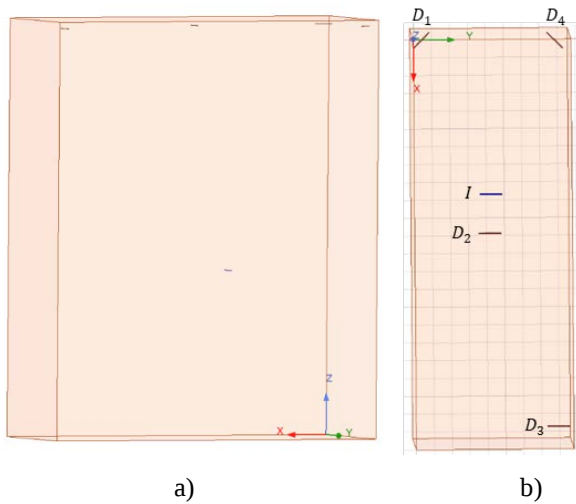
VI REZULTATI SIMULACIJE

ANSYS HFSS kodom koristi se adaptivno umrežavanje, što znači da se postavlja početna mreža, rešava polje, a zatim se ponovo umrežava na osnovu toga gde polja imaju visoku koncentraciju i/ili gradijent. Svaki korak ponovnog umrežavanja naziva se „adaptivni prolaz“. Razlika između svaka dva adaptivna prolaza je ΔS . Dakle, kako bi se osiguralo da je simulacija tačna, ANSYS HFSS kodom rade se adaptivni prolazi dok ΔS ne padne ispod postavljenog praga. Ovim kodom rešavaju se Maksvelove jednačine u smislu S-matrice koja predstavlja procenete prenete ili odbijene snage.

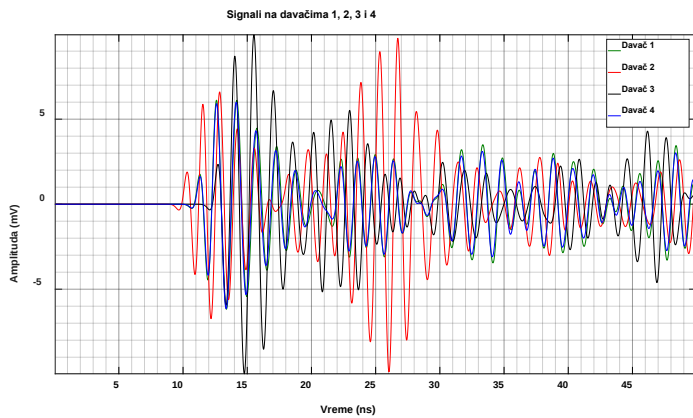
Na slici 5., za položaj izvora parcijalnih pražnjenja I , prikazan je pojednostavljeni model energetskog transformatora koji se sastoji iz suda od nerđajućeg čelika 304 ispunjenog izolacionim mineralnim uljem. Na slici 6. prikazani su u različitim bojama signali parcijalnih pražnjenja na odgovarajuće postavljanim UHF davačima na slici 5. Na slici 7., za položaj izvora parcijalnih pražnjenja I , prikazan je složeniji model energetskog transformatora koji se sastoji iz suda od nerđajućeg čelika 304 ispunjenog izolacionim mineralnim uljem i trostubnog jezgra od električnog čelika. Na slici 8. prikazani su u različitim bojama signali parcijalnih pražnjenja na odgovarajuće postavljanim UHF davačima na slici 7.

Na slici 8. primećuje se pad u amplitudama (slabljenje) snimljenih signala na UHF davačima u odnosu na stanje signala na slici 6. kada nema uticaja trostubnog jezgra. Na slici 9., za položaj izvora parcijalnih pražnjenja I , prikazan je tipični složeni model energetskog transformatora koji se sastoji iz suda od nerđajućeg čelika 304 ispunjenog izolacionim mineralnim uljem,

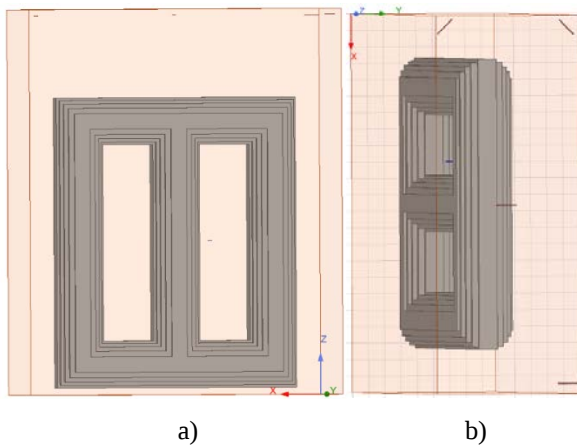
trostubnog jezgra od električnog čelika i trofaznih namotaja niskog i visokog napona napravljenih od bakra.



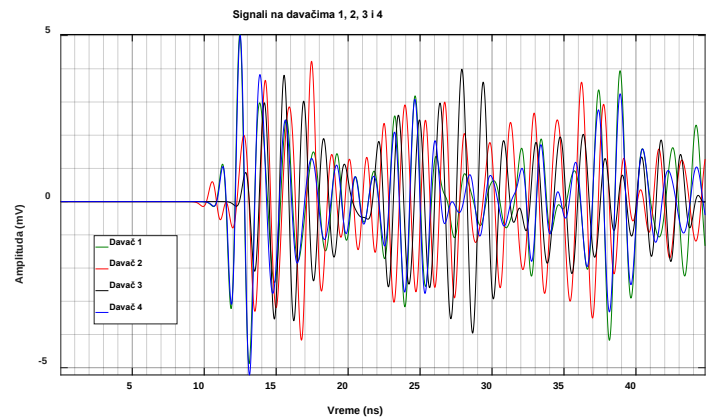
Slika 5. Uprošćeni model: Sud energetskog transformatora ispunjen mineralnim uljem. a) Pogled spreda. b) Pogled odozgo.



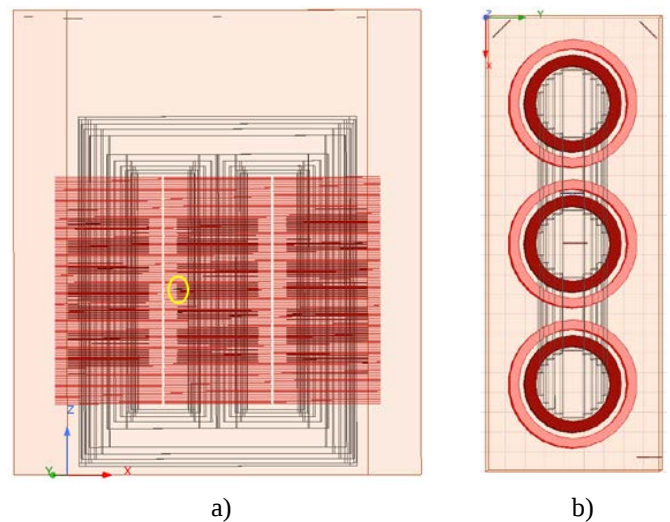
Slika 6. Prikazi signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 sa slike 5. u različitim bojama (zelenom na D_1 , crvenom na D_2 , crnom na D_3 i plavom na D_4).



Slika 7. Složeniji model: Sud energetskog transformatora ispunjen mineralnim uljem sa trostubnim jezgrom. a) Pogled spreda. b) Pogled odozgo.

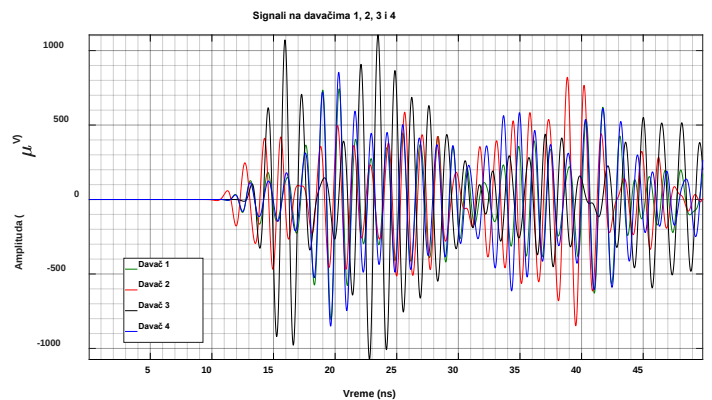


Slika 8. Prikazi signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 sa slike 7. u različitim bojama (zelenom na D_1 , crvenom na D_2 , crnom na D_3 i plavom na D_4).



Slika 9. - Složeni model: Sud energetskog transformatora ispunjen mineralnim uljem sa trostubnim jezgrom i trofaznim namotajima. a) Pogled sa zadnje strane. b) Pogled odozgo.

Na slici 10. prikazani su izgledi signala parcijalnih pražnjenja u različitim bojama na zadato postavljenim davačima na slici 9.



Slika 10. Prikazi signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 sa slike 9. u različitim bojama (zelenom na D_1 , crvenom na D_2 , crnom na D_3 i plavom na D_4).

Na slici 10. primećuje se dalji pad u amplitudama (slabljenje) snimljenih signala na UHF davačima u odnosu na stanje signala na slici 8. kada nema uticaja trofaznih namotaja.

Sa slika 6., 8. i 10. vidi se kako su oblici obvojnica amplituda pojedinih signala na UHF davačima različiti usled dejstava odbijanja od i difrakcije oko raznih metalnih prepreka.

U tabeli 1. dati su trenuci pojave prvog vrha signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 za tri primera simulacije konstrukcije energetskog transformatora.

Tabela 1. Trenuci pojave prvog vrha signala

Konstrukcija	t_1 [ns]	t_2 [ns]	t_3 [ns]	t_4 [ns]
metalni sud (α)	10,671	9,678	12,07	10,694
+metalno jezgro (β)	10,646	9,929	12,223	10,682
+metal. namotaji (γ)	11,289	10,4	12,613	11,31

Iz rezultata u tabeli 1. vidi se da metalno jezgro takoreći ne utiče na putanje signala parcijalnih pražnjenja od izvora do UHF davača D_1 i D_4 , dok se do UHF davača D_2 i D_3 putanja signala produžava i oni kasnije stižu za 0,25 ns i 0,15 ns, respektivno. Trofazni namotaji uz trostubno jezgro utiču na kašnjenje signala od (0,54-0,72) ns, zavisno od položaja davača.

U tabeli 2. prikazane su razlike u vremenima pristizanja signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 za teorijski slučaj (bez prepreka i refleksija od suda) i tri primera simulacije konstrukcije energetskog transformatora. Davač D_1 je uzet za referentni davač.

Tabela 2. Izračunate razlike u vremenima pristizanja signala

Konstrukcija	dt_{21} [s]	dt_{31} [s]	dt_{41} [s]
idealni slučaj (ζ)	-1,025E-09	1,399E-09	3,726E-11
+metalni sud (α)	-9,927E-10	1,399E-09	2,256E-11
+metalno jezgro (β)	-7,169E-10	1,577E-09	3,584E-11
+met. namotaji (γ)	-8,891E-10	1,323E-09	2,068E-11

U tabeli 3. data su uzajamna odstupanja razlika u vremenima pristizanja signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 i srednja vrednost njihovih apsolutnih vrednosti za tri razmatrana primera simulacije energetskog transformatora u odnosu na teorijski - savršeni slučaj. Davač D_1 je uzet za referentni davač.

Tabela 3. Uzajamna odstupanja razlika u vremenima pristizanja signala

Odstupanja razlika u vremenima prispeća	$D_2 - D_1$	$D_3 - D_1$	$D_4 - D_1$
$\Delta(dt_{\alpha,\zeta})$ [s]	3,244E-11	-5,457E-13	-1,47E-11
$ \Delta(dt_{\alpha,\zeta sr}) $ [s]	1,59E-11		
$\Delta(dt_{\beta,\zeta})$ [s]	3,082E-10	1,778E-10	-1,421E-12

$ \Delta(dt_{\beta,\zeta sr}) $ [s]	1,625E-10		
$\Delta(dt_{\gamma,\zeta})$ [s]	1,36E-10	-7,598E-11	-1,659E-11
$ \Delta(dt_{\gamma,\zeta sr}) $ [s]	7,619E-11		

Srednje odstupanje apsolutnih vrednosti razlika u vremenima pristizanja signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1-4 u odnosu na idealni slučaj najveće je u 2. primeru simulacije, a najmanje u 1. primeru simulacije energetskog transformatora.

U tabeli 4. prikazani su izračunati položaji izvora parcijalnih pražnjenja za teorijski slučaj i tri primera oponašanja konstrukcije energetskog transformatora.

Tabela 4. Izračunati položaji izvora parcijalnih pražnjenja

Konstrukcija	x [m]	y [m]	z [m]
idealni slučaj (ζ)	8,935E-01	4,35E-01	1,118E+00
+metalni sud (α)	8,869E-01	4,428E-01	1,08E+00
+metalno jezgro (β)	8,259E-01	4,377E-01	8,497E-01
+met. namotaji (γ)	8,815E-01	4,454E-01	8,944E-01

U tabeli 5. data su uzajamna odstupanja u izračunatim položajima izvora parcijalnih pražnjenja i srednja vrednost njihovih apsolutnih vrednosti za tri razmatrana oponašajuća primera energetskog transformatora u odnosu na teorijski - savršeni slučaj.

Tabela 5. Uzajamna odstupanja u izračunatim položajima izvora parcijalnih pražnjenja

Odstupanja u izračunatim položajima	x	y	z
$\Delta d_{\alpha,\zeta}$ [cm]	-6,635E-01	7,834E-01	-3,762E+00
$ \Delta d_{\alpha,\zeta sr} $ [cm]	1,736E+00		
$\Delta d_{\beta,\zeta}$ [cm]	-6,761E+00	2,702E-01	-2,683E+01
$ \Delta d_{\beta,\zeta sr} $ [cm]	1,129E+01		
$\Delta d_{\gamma,\zeta}$ [cm]	-1,201E+00	1,042E+00	-2,236E+01
$ \Delta d_{\gamma,\zeta sr} $ [cm]	8,199E+00		

Srednje odstupanje apsolutnih vrednosti u izračunatim položajima izvora parcijalnih pražnjenja u odnosu na savršeni slučaj najveće je u 2. oponašajućem primeru konstrukcije energetskog transformatora, a najmanje u 1. simulacijskom primeru.

VII ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je da se izvrši analiza uticaja realne konstrukcije energetskog transformatora na prostiranje UHF talasa parcijalnih pražnjenja u električnoj izolaciji u sudu

transformatora od mesta njihovog nastajanja do prijemnih UHF antena. Prostiranje elektromagnetskih talasa iz izvora parcijalnih pražnjenja je veoma složeno zbog skretanja oko metalnih prepreka i višestrukih odbijanja talasa u energetskom transformatoru.

Pomoću simulacije u HFSS-u omogućen je slikoviti prikaz primljenih UHF signala parcijalnih pražnjenja, obuhvaćene su sve refleksije i difrakcije signala na putu od izvora parcijalnih pražnjenja do UHF davača. Posle određenog vremena, javljaju se u UHF signalima na davačima samo uticaji refleksija. U simulaciji, nedostatak je što je izvor parcijalnih pražnjenja oblikovan u vidu predajne dipolne antene. To znači da izvor nije tačkast, tj. ne zrači podjednako snagom zračenja u svim mogućim pravcima od izvora parcijalnih pražnjenja, što ima uticaja na oblike primljenih signala na različito postavljenim UHF davačima u zidu transformatorskog suda. Takođe nije uzet u obzir nijedan izvor šuma.

Slabljenje signala parcijalnih pražnjenja je utoliko veće ukoliko je veći broj i veličina prepreka na putu između izvora i UHF davača. Odbijeni talasi mogu da izobliče (smanje) prve vrhove i obvojnici prijemnog signala na UHF davaču ukoliko su prepreke veće i bliže predajnoj anteni (zbog odbijanja talasa od same antene) i ukoliko u većoj meri (po broju i veličini) prepreke stoje na putu prostiranja talasa od izvora do UHF davača.

Greška pri određivanju mesta izvora parcijalnih pražnjenja zavisi od tačnosti određenih razlika u vremenima prispeća signala do pojedinih UHF davača. Pojedina vremena prispeća signala zavise od broja metalnih prepreka na putu od izvora do UHF davača.

U simulaciji ne postoji merni uređaj (osciloskop) kojim se snimaju signali sa UHF davača, pa nema ni greške u vremenima prispeća signala do davača usled ograničene rezolucije odabiranja uzoraka signala pri njihovom pretvaranju iz analognog u digitalni oblik.

Razmatran je položaj izvora parcijalnih pražnjenja koji se gledano sproveda nalazi sa desne strane srednjeg stuba jezgra od električnog čelika ispod jarma, u srednjem delu 2. faze trofaznih bakarnih namotaja. Postavljen je između namotaja niskog napona i visokog napona, bliže namotaju niskog napona, i to naspram 22. diska namotaja niskog napona i naspram donjeg dela 22. diska namotaja visokog napona. U tom slučaju, kao i za zadati raspored UHF davača, srednja vrednost apsolutnih vrednosti odstupanja položaja izvora parcijalnih pražnjenja u odnosu na stvarni položaj najveća je kada se uzmu u obzir metalni sud i trostubno jezgro energetskog transformatora i iznosi 11,3 cm.

Kada se i trofazni namotaji uzmu u obzir srednja vrednost apsolutnih vrednosti odstupanja položaja izvora parcijalnih pražnjenja je 8,2 cm. Kada se razmatra samo metalni sud energetskog transformatora srednja vrednost apsolutnih vrednosti

odstupanja položaja izvora parcijalnih pražnjenja je 1,74 cm.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Dukanac, Đ. Otkrivanje i analiza signala parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru UHF metodom, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 96-101, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.096D>
- [2] Dukanac, D. Analysis of partial discharge signal detected by the UHF sensor in the power transformer, in *Proc. 3rd CIGRE SEERC Online-Conference Vienna 2021: Cooperation - Sustainability - Future*, Vienna, Austria, No. 1189, pp. 1-9, November 30, 2021. <https://e-cigre.org/publication/collaut2021-seerc-colloquium-2021>
- [3] Roslizan, N. D., Rohani, M. N. K. H., Rosmi, A. S., Ismail, B., Jamlos, M. A., Leong, W. C., Isa, C. M. N. C., Jalil, M. A. A. Comparison Study of UHF Sensor Modelling Based on 4th Order Hilbert Fractal Category for Partial Discharge Detection in Power Transformer, in *Proc. IEEE 8th Conference on Systems Process and Control (ICSPC) 2020*, pp. 196-201, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICSPC50992.2020.9305753>
- [4] Thiviyathan, V. A., Ker, P. J., Leong, Y. S., Abdullah, F., Ismail, A., Jamaludin, Md. Z. Power transformer insulation system: A review on the reactions fault detection challenges and future prospects, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 61, Is 10, pp. 7697-7713, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.026>
- [5] Coenen, S., Tenbohlen, S., Strehl, T., Markalous, S., Fundamental characteristics of UHF PD probes and the radiation behavior of PD sources in power transformers, in *Proc. IEEE 16th International Symposium on High Voltage Engineering*, South Africa, pp. 666-671, 2009. https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2009_ISH_Coenen_Fundamental_Ch aracteristics.pdf
- [6] Coenen, S., *Measurement of Partial Discharges in Power Transformers Using Electromagnetic Signals*, University of Stuttgart, Germany, pp. 70-73, 2012.
- [7] Coenen, S., Tenbohlen, S., Markalous, S., Strehl, T. Sensitivity Limits of UHF PD Measurements on Power Transformers, in *Proc. IEEE 16th Int. Symp. H.V. Engineering (ISHVE)*, 2009, pp. 1034-1039. https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2009_ISH_Coenen_Sensitivity_Limit s.pdf
- [8] Beura C. P., Beltle M., Wenger P., Tenbohlen S., Experimental Analysis of Ultra-High-Frequency Signal Propagation Paths in Power Transformers, *Energies*, Vol. 15, 2766, pp. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15082766>
- [9] Dukanac, Đ., Application of UHF Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers, in *Proc. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, Is 6, pp. 2266-2278, 2018. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.006996>
- [10] Dukanac, Đ., Lociranje parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru primenom UHF tehnike, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 2, pp. 73-78, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-2.73D>
- [11] Dukanac, Đ., Primena UHF davača za određivanje mesta parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru, in *Proc. Zbornik radova sa međunarodne konferencije „Energy and Ecology Industry“*, Beograd, str. 214-221, 10-13. oktobar 2018., ISBN: 978-86-7466-751-4 (AM).

AUTOR/AUTHOR

Djordje Dukanac - magistar elektrotehničkih nauka, Akcionarsko društvo "Elektromreža Srbije" Beograd, djordje.dukanac@ems.rs, ORCID [0000-0002-1090-3129](https://orcid.org/0000-0002-1090-3129)

Procena uticaja integracije solarnih elektrana na niskom i srednjem naponu na smanjenje vrednosti gubitaka aktivne snage u prenosnom sistemu

Impact Estimation of Distributed Generation from Solar Power Plants Connected to the Distribution System on Active Power Losses in the Transmission System

Vojislav Simović, Miroslav Žerajić

Akcionarsko društvo Elektromreža Srbije

Rezime - Priklučenje solarnih elektrana na niskom i srednjem naponu predstavlja najefikasniji način integracije ovih elektrana u elektroenergetski sistem u celini. Na ovaj način se postiže da proizvodnja bude električno blizu potrošnji, čime se smanjuju tokovi aktivnih snaga po napojnim vodovima prenosne i distributivne mreže u satima kada solarne elektrane proizvode, što kao posledicu, između ostalog, ima smanjenje gubitaka aktivne snage u prenosnom i distributivnom sistemu. Procena uticaja integracije solarnih elektrana na niskom i srednjem naponu na smanjenje vrednosti gubitaka aktivne snage u prenosnom sistemu će biti izvršena na osnovu izmerenih (ostvarenih) vrednosti potrošnje i izmerenih vrednosti gubitaka aktivne snage na satnom nivou, na periodu od godinu dana. Izmerene vrednosti predstavljaju ulazni podatak u simulacioni model prenosnog sistema, kao i referentno stanje u odnosu na koje će biti izvršeno poređenje rezultata nakon integracije solarnih elektrana na niskom i srednjem naponu. Integracija solarnih elektrana će biti modelovana kao smanjenje potrošnje na transformatorskim stanicama 110/X kV/kV uvažavajući satne profile proizvodnje solarnih elektrana i potrošnje na posmatranim transformatorskim stanicama.

Gljučne reči - solarna elektrana, integracija OIE, gubici, distribuirana proizvodnja, energetska efikasnost

Abstract - Connecting solar power plants at low and medium voltage level is the most efficient way to integrate this type of renewable energy source power plant into the power system. With this approach, it is achieved that the generation is close to the consumption/demand and therefore, active power flows on the overhead lines and cables are lower which consequently leads to a reduction of losses both in transmission and distribution system. This estimation will be carried out by using real historical measurements of the consumption/demand and active power losses values for every hour in the one year time period. Those values present inputs for the transmission system simulation model as well as the reference values for comparison of the results after the integration. Distributed generation will be

modelled as load reduction on substations 110/X kV/kV taking into account hourly profiles of both solar power plant generation and consumption/demand on the relevant substations.

Index Terms - solar power plant, RES integration, power losses, distributed generation, energy efficiency

I UVOD

Cilj ovog rada je prikaz jednog od pozitivnih efekata implementacije proizvodnje električne energije neposredno uz potrošnju. Pojavom distribuiranih izvora, koji se priključuju direktno na distributivnu mrežu, dolazi do promene smera tokova snaga u distributivnom sistemu [1]. Uticaj distribuirane proizvodnje na smanjenje tehničkih gubitaka u distributivnoj mreži, u zavisnosti od tehničkog rešenja za priključenje distribuiranog izvora može da smanji, ali i da poveća gubitke u distributivnoj mreži [2]. Pored uticaja na distributivnu mrežu, distribuirani izvori instalirani električno blizu krajnjih potrošača/kupaca utiču na opterećenje kapaciteta prenosne mreže, što znači da će i vrednost gubitaka u prenosnoj mreži varirati u zavisnosti od proizvodnje distribuiranih izvora. U ovom radu će se analizirati uticaj distribuirane proizvodnje na smanjenje gubitaka aktivne snage u prenosnoj mreži na primeru solarnih elektrana. Iako se može reći da je uticaj takve proizvodnje veći na distributivnu mrežu, i to jeste tačno sa aspekta jednog objekta ili čak jednog regiona, tj dela distributivne mreže, ideja ovog rada je analiza globalnog budućeg stanja elektroenergetskog sistema, sa velikom snagom u solarnim elektranama koje su rasprostranjene širom cele teritorije Republike Srbije. Rezultati analiza bi trebalo da ukažu na prednosti integracije obnovljivih izvora zasnovane na distribuiranoj proizvodnji koja, po mišljenju autora, predstavlja najefikasniji i „najzdraviji“ princip integracije OIE.

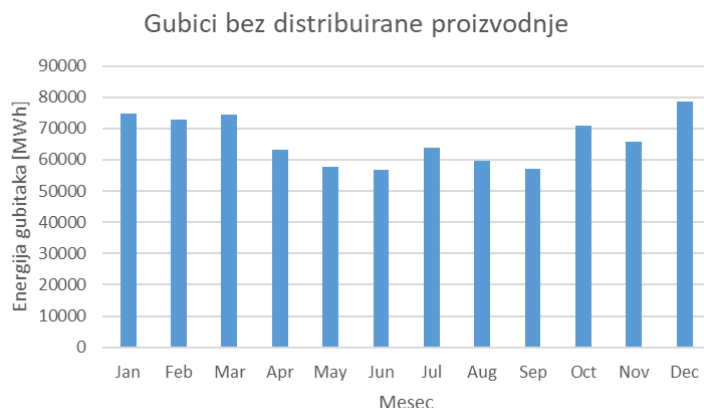
II POLAZNE PRETPOSTAVKE I APROKSIMACIJE

U cilju pojednostavljenja samog proračuna gubitaka i smanjenja broja simulacionih modela na kojima se vrše analize, formirani su aproksimativni modeli. Za svaki od 24 sata u jednom danu, za

svaki mesec, proračunate su srednje vrednosti proizvodnje električne energije iz jedinične solarne elektrane (snage 1MW), potrošnje distributivnih transformatorskih stanica (TS 110/X kV/kV), prekogranične razmene sa susednim OPS i proizvodnje elektrana u elektroenergetskom sistemu Republike Srbije. Zatim su od dobijenih srednjih satnih vrednosti formirani modeli za svaki sat, uz aproksimaciju da je svaki mesec sačinjen od *istih* dana, tj od dana koji čine 24h u kojima vrednosti veličina od interesa predstavljaju srednje vrednosti za svaki sat iz odgovarajućeg meseca. Na ovaj način se značajno redukuje broj modela za proračune dok se ne gubi preciznost informacija o ukupnoj energiji proizvodnje, potrošnje i gubitaka. Za proračune gubitaka je korišćen programski paket PSS/E [3], dok je za automatizaciju proračuna i ispis rezultata korišćen programski jezik *Python* [4]. Za podatke o proizvodnji jedinične solarne elektrane, korišćeni su podaci sistema *PVGIS* [5].

III OPIS PRORAČUNA I REZULTATI

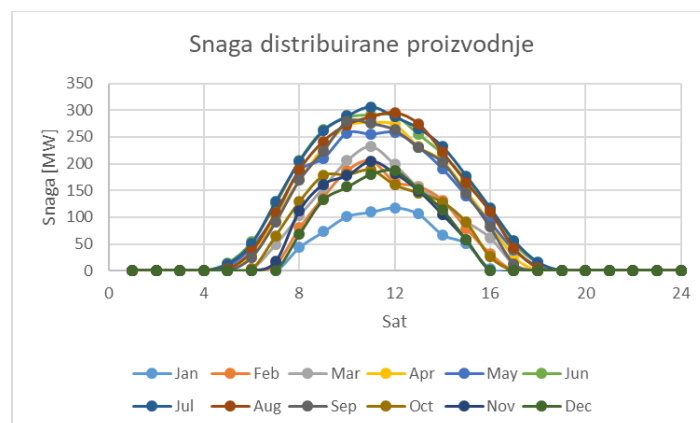
Nakon formiranja simulacionih modela, na način opisan u prethodnom podnaslovu, izvršena je analiza postojećeg stanja, tj. analiza relevantnih veličina pre implementacije distribuirane proizvodnje. Rezultati tih analiza daju vrednosti gubitaka u odnosu na koje će se vršiti poređenje vrednosti gubitaka nakon implementacije distribuirane proizvodnje na distributivnom sistemu. Kao što je rečeno, u ovom radu se posmatraju gubici u prenosnom sistemu i samim tim, elementi na kojima se proračunavaju vrednosti gubitaka su elementi prenosnog sistema, dalekovodi i transformatori naponskog nivoa 110 kV ili više, ne uključujući transformatore 110/X kV/kV u distributivnim transformatorskim stanicama. Na Slici 1 su prikazane ukupne energije gubitaka po mesecima, pre implementacije distribuirane proizvodnje.



Slika 1. Ukupna energija gubitaka po mesecima pre implementacije distribuirane proizvodnje

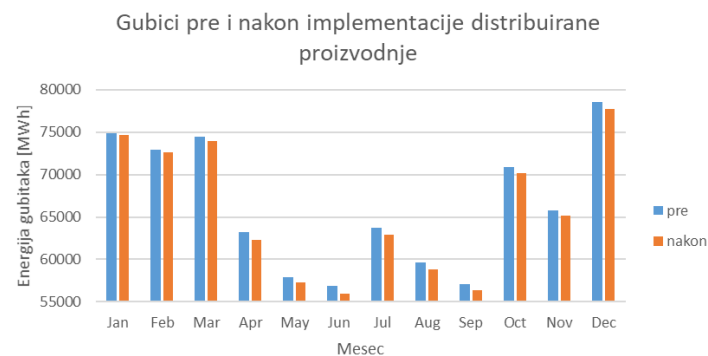
Nakon dobijanja referentnog stanja, potrebno je modelovati distribuiranu proizvodnju i proračunati efekte na vrednost gubitaka u prenosnom sistemu. U ovom proračunu, zbog prirode distribuirane proizvodnje da je pozicionirana neposredno uz potrošnju, uticaj distribuirane proizvodnje je modelovan kao smanjenje potrošnje. Pretpostavljeno je da je instalisana snaga distribuirane proizvodnje jednaka 10% vrednosti maksimalne potrošnje u sistemu. Zatim je prema karakterističnom godišnjem

profilu proizvodnje jedinične solarne elektrane, instalisane snage 1MW, proračunata očekivana proizvodnja u svim srednjim satima skaliranjem tih vrednosti proizvodnje sa vrednošću instalisane snage. Očekivana snaga distribuirane proizvodnje po satima i mesecima je prikazana na Slici 2. Oduzimanjem te proizvodnje od ostvarene potrošnje u odgovarajućim satima, dobijene su nove vrednosti potrošnje koja je smanjena pod uticajem distribuirane proizvodnje. Zbog promene vrednosti potrošnje potrebno je prilagoditi total Srbije. U ovom radu je to izvršeno po principu da se, u režimima u kojima je Srbija izvoznik električne energije, povećava vrednost izvoza, dok se, u režimima u kojima Srbija uvozi električnu energiju, smanjuje vrednost uvoza. U oba slučaja angažovanja generatora u elektroenergetskom sistemu Srbije ostaju nepromenjena.



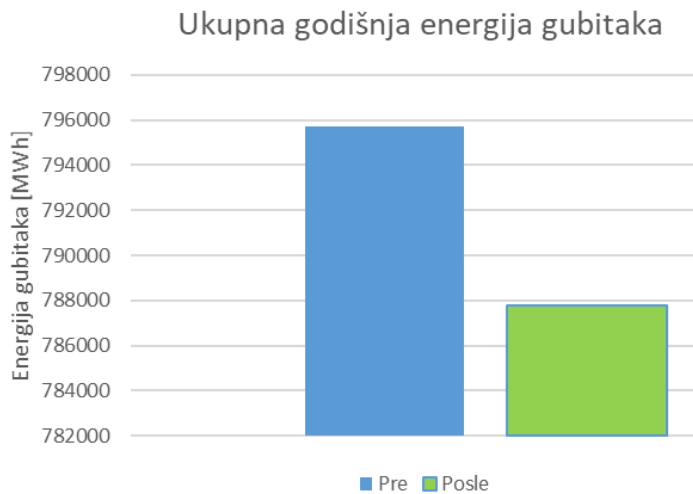
Slika 2. Očekivana snaga distribuirane proizvodnje po satima i mesecima

Nakon dobijanja nove vrednosti potrošnje i novih vrednosti razmene sa susednim zemljama, te vrednosti se unose u softver i proračunom tokova snaga se dobijaju vrednosti snage gubitaka za svaki sat. Zbog prethodno opisane aproksimacije usrednjavanja sati u svakom mesecu, ukupna mesečna energija gubitaka će biti jednaka proizvodu broja dana u mesecu i ukupne energije gubitaka u jednom *srednjem* danu, dok je ukupna energija gubitaka u jednom danu jednaka zbiru satnih vrednosti gubitaka u tom danu. Na Slici 3 je prikazano poređenje vrednosti gubitaka u prenosnom sistemu pre i nakon implementacije distribuirane proizvodnje.



Slika 3. Ukupna energija gubitaka po mesecima pre i nakon implementacije distribuirane proizvodnje

Sabiranjem mesečnih energija gubitaka pre i posle implementacije distribuirane proizvodnje dobijaju se vrednosti ukupne godišnje energije gubitaka za scenarije pre i posle integracije, što je prikazano na Slici 4.



Slika 4. Ukupna godišnja energija gubitaka pre i posle integracije

Oduzimanjem vrednosti za scenarije pre i posle integracije prikazanih na Slici 4 dobija se godišnje smanjenje energije gubitaka u prenosnom sistemu usled integracije distribuirane proizvodnje ukupne snage 450 MW i ono iznosi 7942,9 MWh, što je oko 1% ukupne energije gubitaka pre integracije.

IV ZAKLJUČCI

Nakon sprovedenih analiza prikazan je uticaj distribuirane proizvodnje, priključene na distributivni sistem, na gubitke u prenosnom sistemu. Iz rezultata se vidi da distribuirana proizvodnja smanjuje gubitke u prenosnom sistemu. Iako vrednost smanjenja u procentima nije velika, treba imati u vidu da je ukupna energija gubitaka u prenosnom sistemu i pre i posle integracije veća od ukupne godišnje proizvodnje iz distribuiranih izvora ukupne snage 450 MW, zbog čega smanjenje od 1% nije zanemarljivo. Takođe, treba imati u vidu da je snaga od 450 MW distribuirane proizvodnje mala za teritoriju Republike Srbije i da

se u budućnosti, uzimajući u obzir dobar potencijal solarne energije na teritoriji cele države, može očekivati značajno veća snaga distribuirane proizvodnje čime bi došlo do dodatnog smanjenja gubitaka. Smanjenje gubitaka se može očekivati sve do neke granične vrednosti integracije distribuirane proizvodnje, kada se, zbog promene smera toka aktivne snage (iz distributivnog sistema u prenosni sistem), u odnosu na konvencionalni smer (iz prenosnog sistema u distributivni sistem) vrednost gubitaka izjednači ili poveća u odnosu na stanje pre integracije. Zbog toga je važno da se proces integracije ovakvih izvora planira i sprovodi racionalno. Pored prikazanog uticaja na smanjenje gubitaka, integracija OIE kroz distribuiranu proizvodnju ima i druge pozitivne uticaje koji u ovom radu nisu analizirani, neki od njih su rasterećenje prenosnih i distributivnih kapaciteta, naročito u režimima visoke potrošnje i smanjene propusne moći elemenata elektroenergetskog sistema usled lošijih uslova hlađenja, ušteda prostora ukoliko se solarne elektrane grade na krovovima, korišćenje postojeće infrastrukture za priključenje čime se izbegava izgradnja nove infrastrukture, dok se postojeća efikasnije koristi.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Babić, I., Žarković, M., Distribuirana proizvodnja električne energije sa primerom vetroagregata, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vo. 15, No. 3-4, pp. 259-264, 2013.
- [2] Radošević, V., Komnen, V., Utjecaj distribuirane proizvodnje na gubitke u distribucijskoj mreži, in *Proc. 7(13) savetovanje Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIREN*, Šibenik, SO6-10, 24. - 27. lipnja 2021.
- [3] PSS®E Program Operation Manual, Siemens Industry, Inc., April 2017.
- [4] Programski jezik Python <https://www.python.org/> [pristupljeno 05.03.2022.]
- [5] PVGIS tool, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/, [pristupljeno 05.03.2022.]

AUTORI/AUTHORS

msr Vojislav Simović – master inženjer elektrotehnike i računarstva, Vodeći inženjer za izradu sistemskih studija, vojislav.simovic@ems.rs, ORCID [0000-0002-8532-5378](https://orcid.org/0000-0002-8532-5378)
msr Miroslav Žerajić - master inženjer elektrotehnike i računarstva, Stručnjak za razvoj prenosnog sistema, miroslav.zerajic@ems.rs, ORCID [0000-0001-9601-9045](https://orcid.org/0000-0001-9601-9045)

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.3

ENERGIJA, ekonomija, ekologija : list Saveza
energetičara / glavni i odgovorni urednik Dušan Gordić
. - God. 1, br. 1 (1996)- . - Beograd : Savez energetičara,
1996- (Kragujevac : Mašinac). - 29 cm

Tromesečno. - Drugo izdanje na drugom medijumu:
Energija, ekonomija, ekologija (Online) = ISSN 2812-7528
ISSN 0354-8651 = Energija (Beograd)
COBISS.SR-ID 108696839



www.savezenergeticara.org