

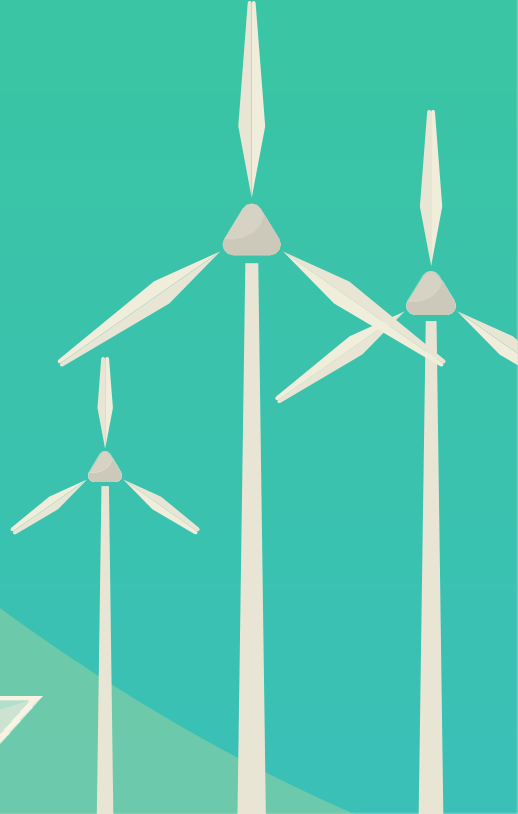
ISSN 0354-8651



List Saveza energetičara
Broj 2 / Godina XXVI / Jun 2024.

energija

| ekonomija | ekologija



Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 2, Jun 2024

Izdavač:

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

Suizdavači:

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

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, Kragujevac

Uređivački odbor i izdavački savet:

prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Beograda
prof. dr Dejan Ivezić, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
prof. dr Mirko Komatina, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Miloš Banjac, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Popović, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Stevanović, Mašinski fakultet, Beogradu
prof. dr Željko Despotović, Institut Mihailo Pupin, Beograd
prof. dr Vanja Šušteršić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
prof. dr Petar Đukić, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
prof. dr Damir Đaković, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
dr Vladimir Šiljkut, JP Elektroprivreda Republike Srbije
v. prof. dr Vladimir Vukašinović, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
docent dr Tomislav Rajić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
dr Iva Batić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
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 Čirić, 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] Danijel PAVKOVIĆ, Sandra STANKOVIĆ, Karlo KVATERNIK, Nikolina SITAR, Mihael CIPEK
Adaptive Models for Improved Battery Charging Systems / Adaptivni modeli za poboljšane sisteme punjenja baterija
- [10] Om SHANKAR DEV, Ilija BATAS BJELIC, Rhythm SINGH
Rapid Decarbonization Roadmap for India Based on Photovoltaic Systems / Mapa puta brze dekarbonizacije Indije bazirana na fotonaponskim sistemima
- [15] Predrag MRŠIĆ, Čedomir ZELJKOVIĆ, Predrag STEFANOV
Procjena mogućnosti priključenja fotonaponskog sistema na srednjenaponsku distributivnu mrežu primjenom sekvencijalne Monte Carlo simulacije / Assessing the Possibility of PV Integration to the Medium Voltage Distribution Network by Using Sequential Monte Carlo Simulation
- [25] Miroslav PAROVIĆ
Može li veštačka inteligencija da doprinese pravednoj energetske tranziciji? / Could Artificial Intelligence (AI) Contribute to a Just Energy Transition?
- [31] Vladimir VUKAŠINOVIĆ, Dušan GORDIĆ, Jelena NIKOLIĆ, Mladen JOSIJEVIĆ, Davor KONČALOVIĆ
Uticaj individualnih ložišta na biomasu na zagađenost vazduha u urbanim sredinama / The Impact of Biomass-Fired Stoves on Air Pollution in Urban Areas

- [38] Željko V. DESPOTOVIĆ, Miodrag VUKOVIĆ
Detekcija i kontrola struje curenja solarnih invertora / Detection and Control of Leakage Current of PV Inverters

- [47] Stefan ČUBONOVIC, Aleksandar RANKOVIC, Marko KRSTIC
Primena veštačkih neuronskih mreža za predikciju snage na izlazu hidroelektrane / The Application of Artificial Neural Networks for Predicting the Power Output of a Hydroelectric Power Plant

- [55] Draško KOVAČ, Sead CVRK, Đorđe NEDELJKOV
Analiza uticaja različitih vrsta goriva na potrošnju i izduvne emisije brodskog dvotaktnog dizel motora / Analysis of the Impact of Different Fuel Types on Fuel Consumption and Exhaust Emissions of a Two-Stroke Marine Diesel Engine

- [61] Đorđe DUKANAC
Analiza ispunjenosti uslova za mernu nesigurnost sistema za kontrolu pametnih brojila i smanjenje vremena provere registra / Analysis of Fulfilment of Conditions for Measurement Uncertainty of the Smart Meter Control System and Reduction of Register Check Time

- [71] Branko STANKOVIĆ
Modified Steam-Turbine Rankine Cycle without Rejection of the Cycle Condensation Heat, Driven by a Wet-Vapor-Region Thermocompressor / Modifikovani Rankinov ciklus parne turbine bez odbacivanja toplote kondenzacije ciklusa, pokretan termokompresorom koji radi u oblasti vlažne pare

Adaptive Models for Improved Battery Charging Systems

Danijel Pavković*, Sandra Stanković**, Karlo Kvaternik***, Nikolina Sitar****, Mihael Cipek*

* University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, Croatia

** Academy of Applied Technical and Preschool Studies Department of Niš, Niš, Serbia

*** AVL-AST d.o.o., Zagreb, Croatia

**** Rimac Technology, Sveta Nedelja, Croatia

Abstract – During its operation, sometimes it is needed to swiftly replenish the battery from a partially depleted state, while strictly adhering to its technological limitations such as the battery terminal voltage and rated continuous charging current. To achieve this goal, this contribution outlines the dynamic battery recharging system, utilizing feedback provided by the nonlinear estimator of the battery state-of-charge (SoC) or SoC-related open-circuit-voltage (OCV). In the former case, the estimator is realized as an extended Kalman filter (EKF), while in the latter case it is implemented using the methodology of a System Reference Adaptive Model (SRAM), whose design is based on the Lyapunov stability theory. Thus-obtained innovative adaptive battery chargers are compared against the conventional constant-current/constant-voltage (CCCV) charging system, which relies solely on battery voltage feedback. A comprehensive comparative analysis is conducted through extensive simulations utilizing the nonlinear equivalent circuit model of the lithium titanate battery (LTO) cell.

Index Terms – Battery charging, State-of-charge, Nonlinear estimators, Extended Kalman filter (EKF), System Reference Adaptive Model (SRAM)

I INTRODUCTION

The widespread integration of renewable energy sources, such as solar and wind power, into the electricity grid presents exciting opportunities for a sustainable future [1]. However, their inherent variability necessitates robust energy storage solutions to bridge periods of low generation and ensures local grid stability [2]. Batteries play a crucial role in this context, enabling the storage and utilization of renewable energy when available, while providing reliable power when needed, as showcased for the cases of water desalinization systems [3] and sustainable eco-industrial enterprises [4].

Conventional battery charging systems, such as the widely used constant-current/constant-voltage (CCCV) method, prioritize simplicity and ease of implementation [5]. However, they lack the ability to adapt to individual battery characteristics or dynamic operating conditions [6]. This limitation can lead to suboptimal charging times, reduced battery life, and even safety concerns due to overcharging [7, 8].

Several techniques address battery voltage and temperature constraints. The MPC approach [9, 10] dynamically adjusts the charging current to honor the temperature bounds, while artificial intelligence approaches, such as fuzzy logic control [11] and neural networks [12], rely on data-driven learning to adapt to

varying battery conditions. Offline approaches such as genetic algorithms [13, 14], dynamic programming [15], and multi-objective optimization [16] optimize the charging current profiles. However, the usefulness of the latter approach is limited by battery parameter variations during operation. To address this, online state-of-charge (SoC) estimation has been integrated with conventional charging control [17] to optimize the charging speed while respecting the charging current-related temperature limits. The additional benefit of SoC estimator-based approaches is in ensuring high precision of the final battery SoC at the end of the charging process.

Battery SoC estimation is typically based on the nonlinear battery model embedded within the nonlinear SoC estimator, typically realized in the form of an extended Kalman filter of EKF [18], wherein the battery equivalent circuit model used within the EKF-based estimator [19] can have different levels of complexity [20], or the battery can be represented by its equivalent electrochemical model [21]. Estimating the open-circuit-voltage (OCV) that is directly related to the SoC can be performed by utilizing Lyapunov stability theory and a System Reference Adaptive Model (SRAM) that dynamically estimates the battery model parameters in real time [22], and thus can be used for supervision of the charging process without requiring the explicit a-priori knowledge of the process model parameters [23]. A good overview of battery SoC estimation techniques can be found in [24].

Adaptive SoC feedback and OCV feedback systems for charging process speed-up have been previously proposed in [25] and [23], respectively. In these applications of the adaptive charging systems presented in [23] and [25], a LiFePO₄ battery cell characterized by the relatively moderate nominal rated charging rate of 0.3C (30% of charge capacity per hour) has been used [26]. The comprehensive simulation analysis presented in [23] and [25] has shown that by increasing the maximum charging current towards 0.7C in both the conventional charging benchmark and adaptive control strategies, adaptive control strategies can achieve about 25% speedup compared to the benchmark case of a conventional CCCV charging. The advent of next-generation lithium titanate or lithium titanium oxide (LTO) battery cells has motivated further research of these adaptive charging control strategies because these cells are characterized by superior performance in terms of maximum continuous charging current (with 1C charging rates having minimal effect on the battery cell aging), as well as superior thermal stability and overall robustness [27].

To this end, this paper presents and compares the previously

proposed adaptive charging systems from [23, 25], which were designed to overcome the limitations of conventional methods by means of augmenting (retrofitting) the conventional CCCV charging system with an additional feedback loop based on SoC-related information. Building upon established nonlinear estimation techniques, the presented approaches can achieve faster and safer charging while respecting battery safety constraints in terms of terminal voltage and continuous charging current limitations. The study presented in this paper assesses the benefits of charging strategies previously developed for earlier-generation and lower charging rate LiFePO₄ battery cell to the novel high charging rate LTO cell. It systematically examines in the MATLAB/Simulink simulation environment the effect of initial battery SoC and charging current limit to the relative speed-up of the two adaptive control strategies with respect to the conventional charging system benchmark, and the main results of this simulation study are confirmed by means of experiments.

The paper is organized as follows. Section II presents the charging system layout, whereas Section III presents the experimentally identified battery equivalent circuit model. Section IV outlines the three charging strategies whose performance (charging speed) is examined and compared in this paper, along with the SoC and OCV estimators used within the adaptive control strategies. Section V presents the results of comprehensive simulation assessment of adaptive control strategies with respect to the conventional charging benchmark,

whereas Section VI presents the results of experimental verification of the proposed battery charging systems. Section VII presents a brief discussion of the obtained results, while the concluding remarks are given in Section VIII.

II CHARGING SYSTEM LAYOUT

Fig. 1 (right) depicts a conventional battery charging system schematic. The core topology is a buck DC/DC converter comprised of switching element Q (MOSFET), energy storage inductor L_c , and parallel freewheeling diode D . For active load scenarios (e.g., a battery cell), the optional series-connected blocking diode D_b safeguards against reverse current flow. Converter output voltage (u_c) is regulated by an embedded current controller. This controller receives its setpoint (i_{br}) from a supervisory control layer, from either a battery voltage controller or a SoC management system [8], as discussed in subsequent sections.

Figure 1 (left) presents an equivalent circuit model for a battery cell. It features a series-connected ideal voltage source (U_{oc}) representing the cell's open-circuit voltage U_{oc} connected in series with a parallel RC circuit and an additional series resistance R_b . The above RC circuit models the cell's dominant electrolyte polarization behavior (with R_p being the polarization resistance, and C_p being the polarization capacitance). Finally, the cell's equivalent series resistance is represented by the resistor R_b .

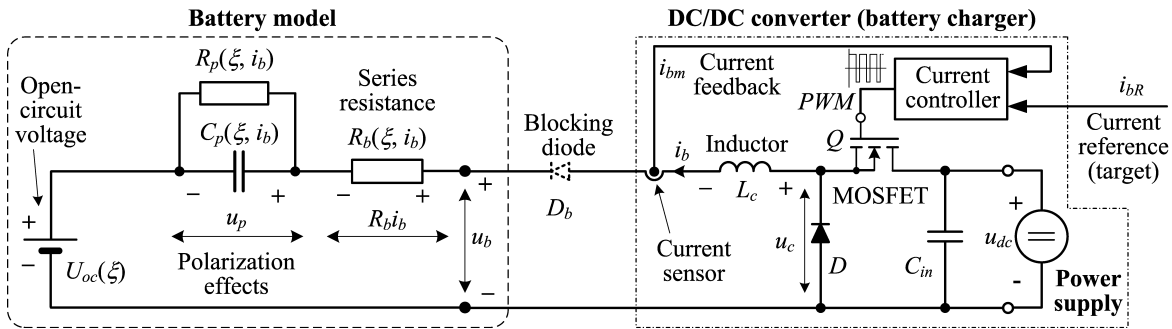


Figure 1. Battery charging system with buck converter and battery equivalent electrical circuit model [8]

III BATTERY MODEL

Applying the Kirchhoff's voltage law to the battery model in Fig. 1, the battery terminal voltage is expressed as follows [28]:

$$u_b = i_b R_b + u_p + U_{oc}. \quad (1)$$

Battery SoC (ξ) is defined as the time integral of battery current, normalized by battery charge capacity Q_b :

$$\xi = \frac{1}{Q} \int i_b dt \Leftrightarrow \dot{\xi} = \frac{i_b}{Q} \quad (2)$$

while the polarization voltage u_p term in equation (2) can be expressed as [13]:

$$u_p = \frac{1}{\tau_p} \int (u_p - R_p i_b) dt \Leftrightarrow \dot{u}_p = \frac{u_p - R_p i_b}{\tau_p} \quad (3)$$

where $\tau_p = R_p C_p$ is the polarization time constant.

The designs of nonlinear estimators of battery SoC and OCV, which are presented subsequently, are based upon the battery terminal voltage equation (1) combined with the differential equation (2) and state-of-charge differential equation (3). In particular, equation (2) is used within the SRAM-based OCV estimator design, whereas both equations (2) and (3) are needed to define a suitable state-space model for the design of EKF-based state estimator.

Figures 2 and 3 depict experimentally derived relationships between the SoC, battery current, and battery model parameters of a commercial 30 Ah/2.4V/6C LTO cell's equivalent circuit model [28]. These include the OCV vs. SoC dependence, series resistance, polarization resistance, and polarization time constant $\tau_p = R_p C_p$. The presented data have been obtained under constant-temperature ambient conditions. The characteristics reveal marked SoC-dependence for all modeled parameters, particularly

at extreme SoC levels. These experimentally determined parameter maps (Figures 2 and 3) are directly integrated into Eqs. (1)-(3) within a MATLAB/Simulink simulation model. The model, having battery current (i_b) as input and battery terminal voltage (u_b) as output, is schematically represented by block diagram in Fig. 4.

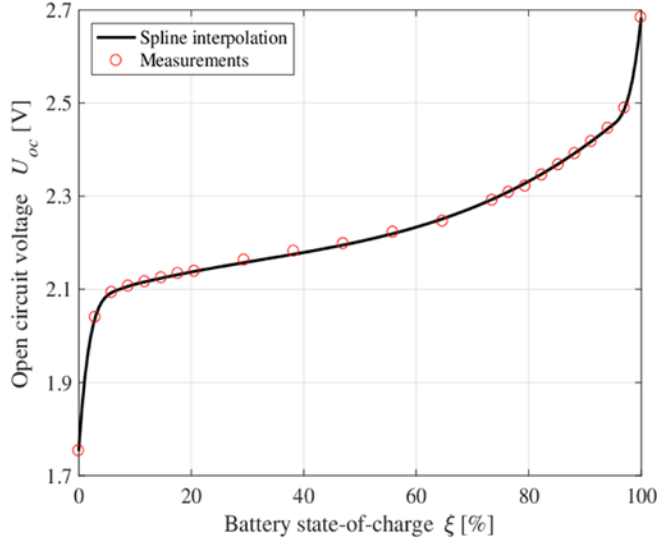


Figure 2. Battery OCV vs. SoC curve

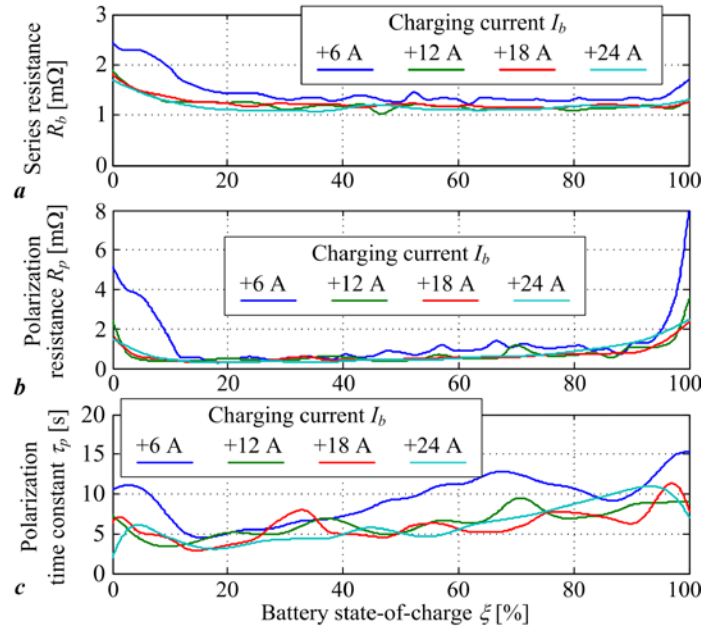


Figure 3. (a) Equivalent series resistance, (b) polarization resistance, and (c) polarization time constant curves

IV CONTROL SYSTEMS UNDER INVESTIGATION

Block diagrams in Fig. 5 depict the three battery charging control strategies from [5], [25] and [23]). Firstly, the conventional CCCV controller with voltage limiting (CCCV-VL), which is considered as a benchmark case is shown in Fig. 5a [5]. This charging control system uses a voltage limiting controller based on battery terminal voltage feedback (u_{bm}). The current reference (target value) i_{bR} combines the maximum charging current (I_{max} ,

used during the constant-current phase) and the controller's limiting command (i_{blim}), which reduces the charging current when u_{bm} exceeds its limit (target) value u_{blim} . The latter constant-voltage phase is characterized by asymptotically decreasing charging current and the battery terminal voltage approaching the SoC-dependent OCV $U_{oc}(\xi)$, i.e. $i_b \rightarrow 0$, $u_b \rightarrow U_{oc}$ [5].

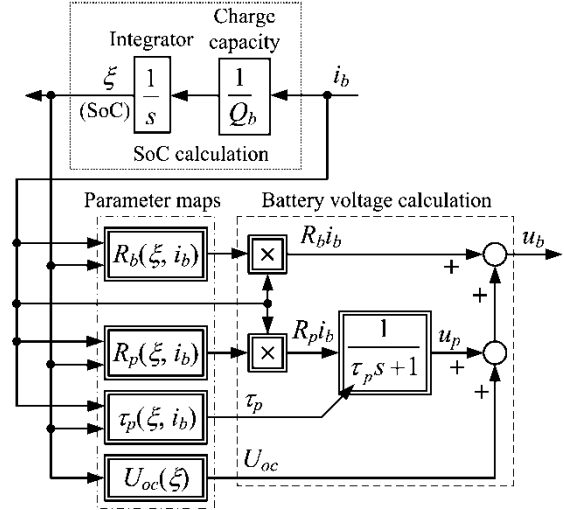


Figure 4. Block diagram of battery equivalent circuit model

Fig. 5b illustrates the so-called CCCV-SoC adaptive approach using SoC feedback [25]. Here, the principal SoC controller is provided with the SoC target value and produces the charging current reference i_{bR} (limited to I_{max} during the constant-current phase) based on SoC feedback provided by the SoC estimator. The SoC estimator, implemented in the form of an EKF, can be regarded as an adaptive digital twin (see e.g. [28]) of the battery cell, thus allowing for more targeted charging towards the fully charged state when compared to the conventional (CCCV-VL) charging system. The voltage limiting PI controller now provides a safety function by constraining the battery voltage to u_{blim} . Notably, this limit value (u_{blim}) can now be made higher than in the case of CCCV-VL strategy and is preset independently of the SoC control loop. Such modular control system structure allows conventional systems from Fig 5a to be easily upgraded with adaptive features.

Finally, Fig 5c shows an adaptive control system with the OCV controller, denoted herein as the CCCV-OCV control strategy [23]. The primary OCV controller uses the estimated OCV feedback, commanding the current reference i_{bR} , again limited to I_{max} . OCV feedback (U_{oc} estimate) is provided by the SRAM estimator. To estimate the battery model parameters in real-time, SRAM-based estimator requires continuous excitation via a pseudo-random binary sequence (PRBS) test signal Δi_{bR} superimposed to the overall current reference ($i_{bR} + i_{blim}$), see e.g. [23]. Similar to previous charging control strategies, the voltage limiting controller ensures safe operation by maintaining the battery terminal voltage below the limit value u_{blim} via its current command i_{blim} . Again, u_{blim} is preset independently of the target open-circuit voltage (OCV reference) U_{ocR} [23].

Figure 6 shows principal block diagram representations of the EKF-based SoC estimator from [25] and OCV estimator based

on SRAM principle from [23]. Both nonlinear estimators are implemented as feedback loop systems. In particular, these estimators attempt to minimize the model output prediction error e_m between the estimated battery voltage (battery model output) and the battery voltage measurement by means of corrective feedback action.

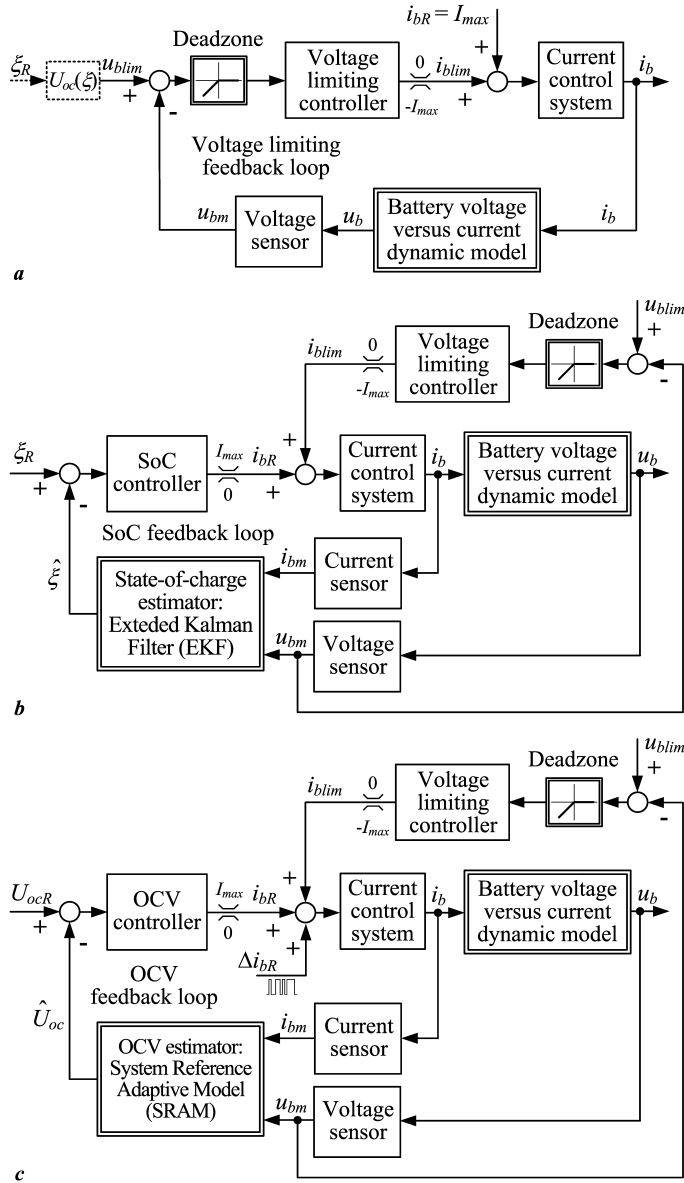


Figure 5. Block diagram of (a) CCCV-VL charging control strategy, (b) CCCV-SoC control strategy, and (c) CCCV-OCV control strategy

In the case of EKF-based SoC estimation (Fig. 6a), the estimated battery model output is obtained from the copy (digital twin) of the battery model (equations (1) – (3)) implemented with a-priori known parameter maps (Figs. 2 and 3), as illustrated in Fig. 4. The battery voltage prediction error is multiplied by Kalman filter gains matrix $\mathbf{K}$ and fed back to the model to compensate for the model following error e_m . The so-called optimal gains of the EKF-based estimator are calculated based on the linearized process model (Fig. 6a). The SRAM-based battery model parameters estimator (Fig. 6b) uses the known structure of the

battery model and adapts the model parameters on-line by using the Lyapunov stability criterion-based adaptation law [23] which requires battery voltage and current filtering and related extraction of battery current time derivative. These signals are then combined with the adaptive model prediction error e_m to provide the adaptation law for on-line parameter updates. As mentioned above, the SRAM-based parameter estimator requires that the CCCV-OCV control system is subjected to persistent excitation realized by means of the superimposed PRBS signal Δi_{bR} (see Fig. 5c).

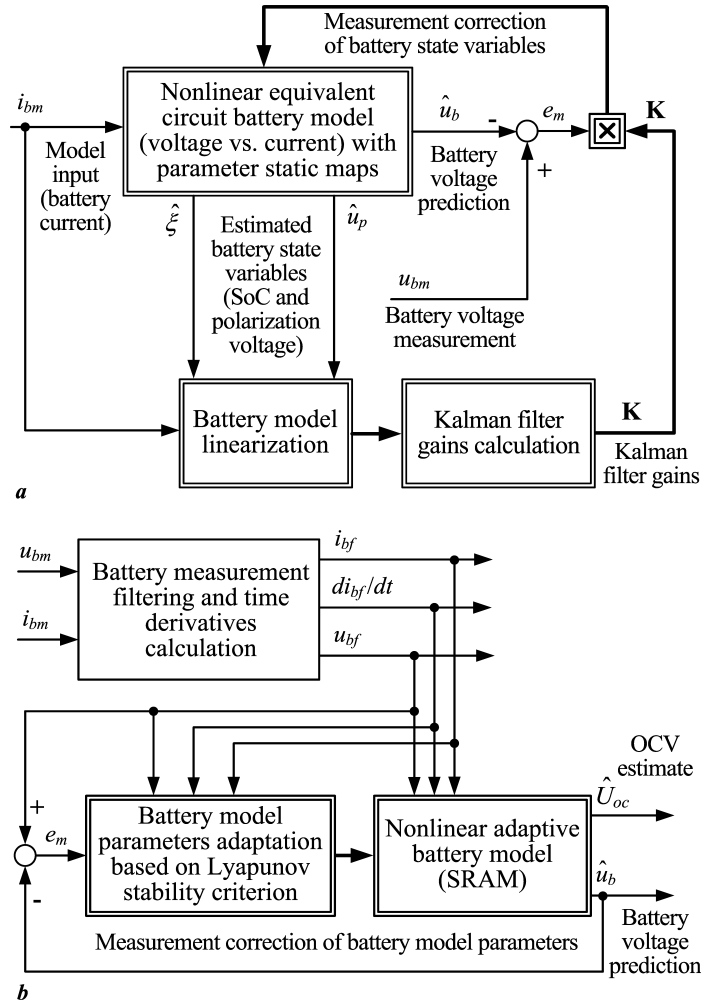


Figure 6. Principal block diagrams of (a) EKF-based battery state-of-charge estimator and (b) battery OCV estimator based on SRAM principle

Detailed design procedures for CCCV-VL, CCCV-SoC and CCCV-OCV control systems and the respective battery state and parameter estimators can be found in references [25] and [23].

V COMPARATIVE SIMULATION RESULTS

Simulations comparing various charging strategies considered different initial battery SoC levels (ξ_0) and constant-current stage charging current limits (I_{max}). Table 1 summarizes these values and additional key simulation parameters. Notably, the charging process terminates in the constant-voltage stage when the battery current falls below the turn-off current (I_{min}).

Table 1. Simulation model and charging scenarios parameters.

Parameter	Value
Battery cell charge capacity Q_b	30 Ah
Charging current rated value (1C rate)	30 A
Charging strategy current maximum values I_{max} in simulation scenarios	30 A, 24 A, 18 A, 12 A (1C, 0.8C, 0.6C, 0.4C)
Charging strategy turn-off current I_{min}	0.3 A (0.01C)
Battery SoC initial conditions ξ_0	20%, 40%, 60%, 80%
CCCV-VL voltage limit u_{blim}	2.68 V
CCCV-SoC/OCV voltage limit u_{blim}	2.72 V
Battery SoC target value ξ_R	100%

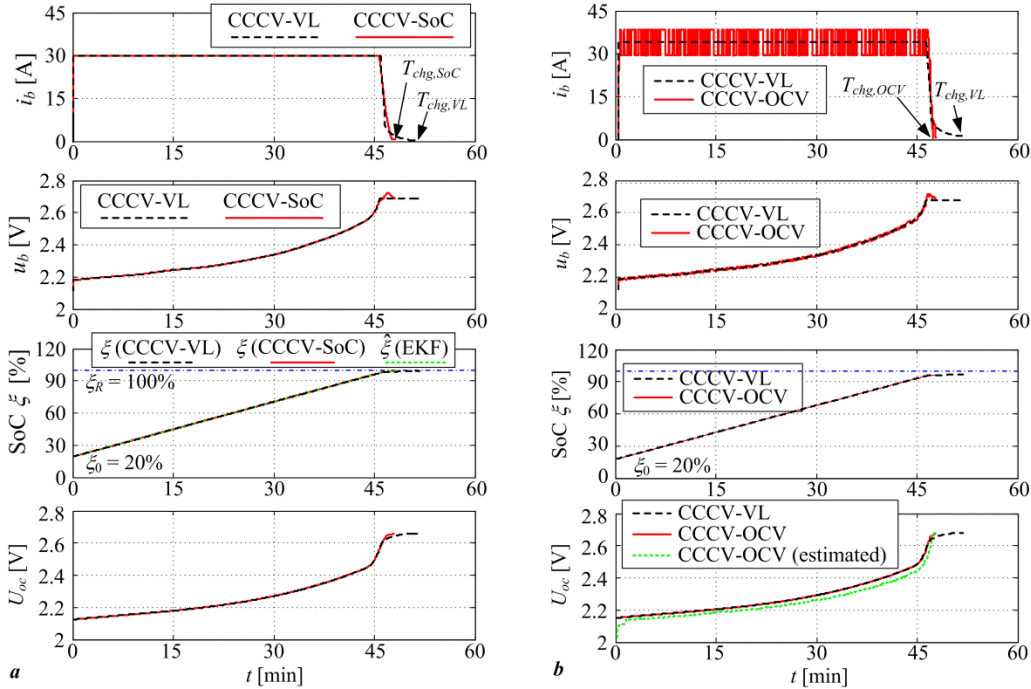
Figure 7 shows the comparative simulation responses of the presented charging strategies with $I_{max} = 30$ A, which corresponds to 1C rate for the LTO cell under examination [30], and initial SoC at 20%. Both the CCCV-SoC and CCCV-OCV strategies exhibit a sharper transition to zero current post constant-current charging compared to the CCCV-VL strategy's asymptotic transient towards zero current. This results in shorter charging times (see top plots in Figs. 7a and 7b), facilitated by the CCCV-

SoC and CCCV-OCV strategy's ability to briefly exceed terminal voltage limits during the final phase (see battery voltage traces in Figs. 7a and 7b). Both adaptive control strategies (CCCV-SoC and CCCV-OCV) achieve near-identical final SoC values. The EKF-based SoC estimator accurately tracks the battery's actual SoC (Fig. 7a), whereas the SRAM estimator OCV tracking ability is somewhat less favorable in the initial portion of the response (Fig. 7b). The latter can be partly attributed to the rate of change of OCV when SoC is quite low, as shown in Fig. 2.

Figure 8 presents the relative charging speedup factors κ_{chg} and the final SoC mismatch $\Delta\xi_{fin}$ values for simulation scenarios given in Table I for both adaptive charging strategies (CCCV-SoC and CCCV-OCV) compared to conventional CCCV-VL charging strategy. The relative speedup factor κ_{chg} of the adaptive CCCV-SoC and CCCV-OCV charging strategies to the conventional CCCV-VL strategy is calculated as the ratio of the difference in charging times as follows:

$$\kappa_{chg} = \left(1 - \frac{T_{chg,SoC(OCV)}}{T_{chg,VL}}\right) \cdot 100\% \quad (4)$$

where $T_{chg,VL}$, $T_{chg,SoC}$ and $T_{chg,OCV}$ are CCCV-VL, CCCV-SoC and CCCV-OCV strategy charging times, respectively.

**Figure 7.** Comparative simulation results: (a) CCCV-VL vs. CCCV-SoC strategy and (b) CCCV-VL vs. CCCV-OCV strategy for 30 A current limit and initial SoC of 20%

The second criterion that can be used to assess the presented charging strategies is final SoC mismatch $\Delta\xi_{fin}$ between the CCCV-VL and the CCCV-SoC strategy, given by:

$$\Delta\xi_{fin} = \xi_{fin,VL} - \xi_{fin,SoC(OCV)} \quad (5)$$

where $\xi_{fin,VL}$, $\xi_{fin,SoC}$ and $\xi_{fin,OCV}$ are the final SoC values obtained by the CCCV-VL, CCCV-SoC and CCCV-OCV strategies.

The results presented in Fig. 8 clearly demonstrate consistent

charging time reduction of adaptive charging control strategies compared to the CCCV-VL benchmark. Recharging speedup is most prominent (over 20%) at higher charging currents (higher I_{max}) and initial SoC (higher ξ_0). As explained in Figs. 7 and 8, CCCV-SoC and CCCV-OCV exhibit a slightly lower final SoC (ξ_{fin}) due to their sharper current termination. However, the final SoC mismatch $\Delta\xi_{fin}$ remains consistently below 0.2%, thus being inconsequential in practical applications.

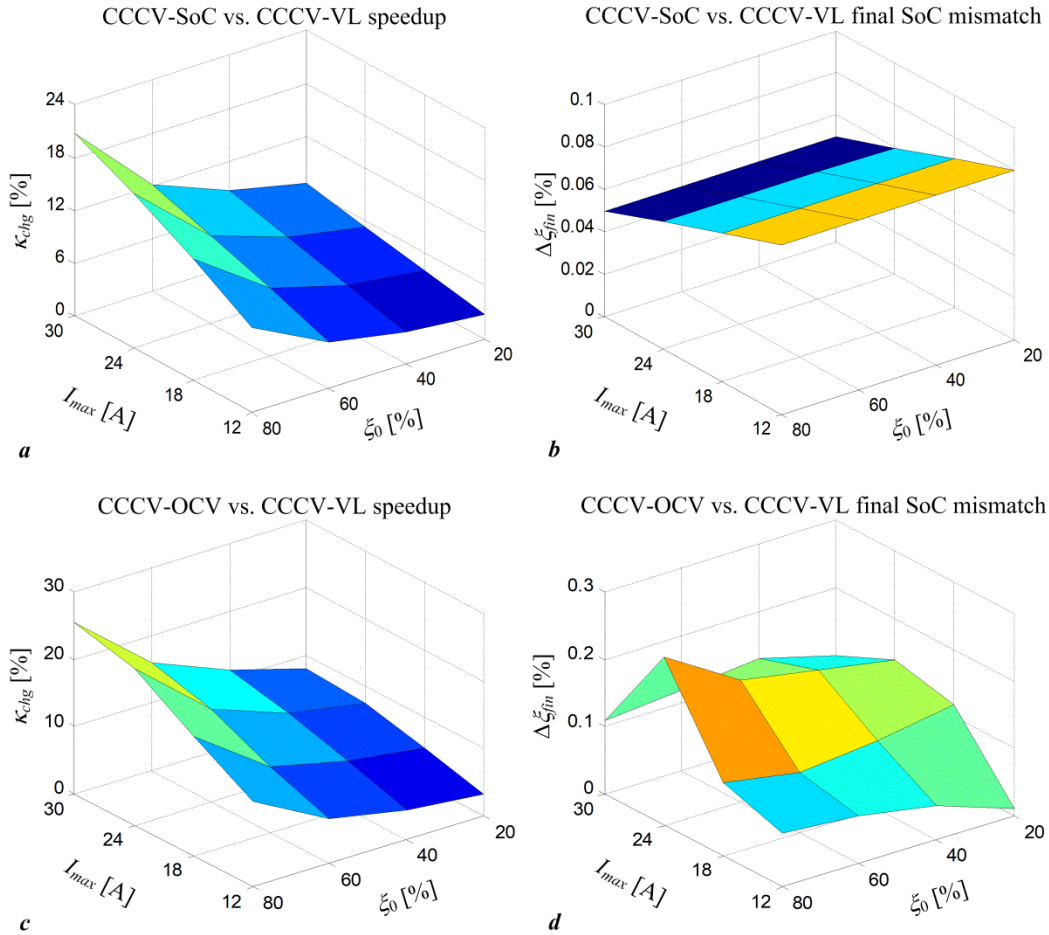
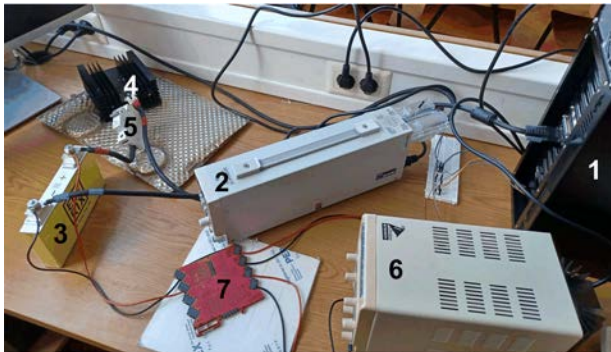


Figure 8. Comparative performance indices CCCV-SoC and CCCV-OCV strategies compared to CCCV-VL benchmark: (a) CCCV-SoC charging speedup and (b) final SoC mismatch, and (c) CCCV-OCV charging speedup and (d) final SoC mismatch

VI EXPERIMENTAL RESULTS

Experimental verification of the proposed charging concept has been carried out on the battery test setup shown in Fig. 9.



Legend: 1 – control computer equipped with acquisition and control cards; 2 – DC/DC power converter; 3 – lithium-titanate battery cell (30 Ah / 2.4 V); 4 – blocking diode; 5 – circuit breaker; 6 – auxiliary 24 V_{dc} power supply; 7 – battery terminal voltage isolation amplifier

Figure 9. Photograph of the battery experimental setup

An industrial control computer “1” equipped with cards for acquisition and control executes the dedicated real-time control

code and commands appropriate current reference to the laboratory power source “2” for charging the commercial 30Ah/2.4V/6C LTO battery cell “3” [30]. A high-power blocking diode “4” prevents accidental reverse current flow and protects the circuit in the case of incorrect connection of power terminals, while a circuit breaker “5” is used for over-current protection. For galvanic isolation of the battery voltage measurement analog input from the DC/DC converter power terminals, the setup also features an isolation amplifier for voltage measurement “7” with its own separate power supply “6”.

Figures 10 and 11 show the comparative experimental results of the proposed control strategies. Tests were conducted with an upper charging current limit of 18A (0.6C) and two initial SoC values: $\xi_0 = 4.2\%$ (very depleted) and $\xi_0 = 69.5\%$ (medium-high). The initial SoC values were determined from the battery's idling voltage (u_0) measured before the charging started (see Figs. 10 and 11). The study did not consider higher charging current limits (0.8C and 1C) due to a safety constraint: increased heat losses at the reverse-flow blocking diode. Results in Figs. 10 and 11 confirm that all three charging strategies can successfully bring the battery SoC (OCV) towards the target value which corresponds to 100% battery SoC. Moreover, the experimental results also confirm the key findings of the simulation analysis conducted for a broader range of initial SoC conditions and

current limit values. Specifically, they confirm that the CCCV-OCV and CCCV-OCV control strategies can achieve a

noticeable speedup in the charging process with respect to the conventional CCCV-VL charging strategy.

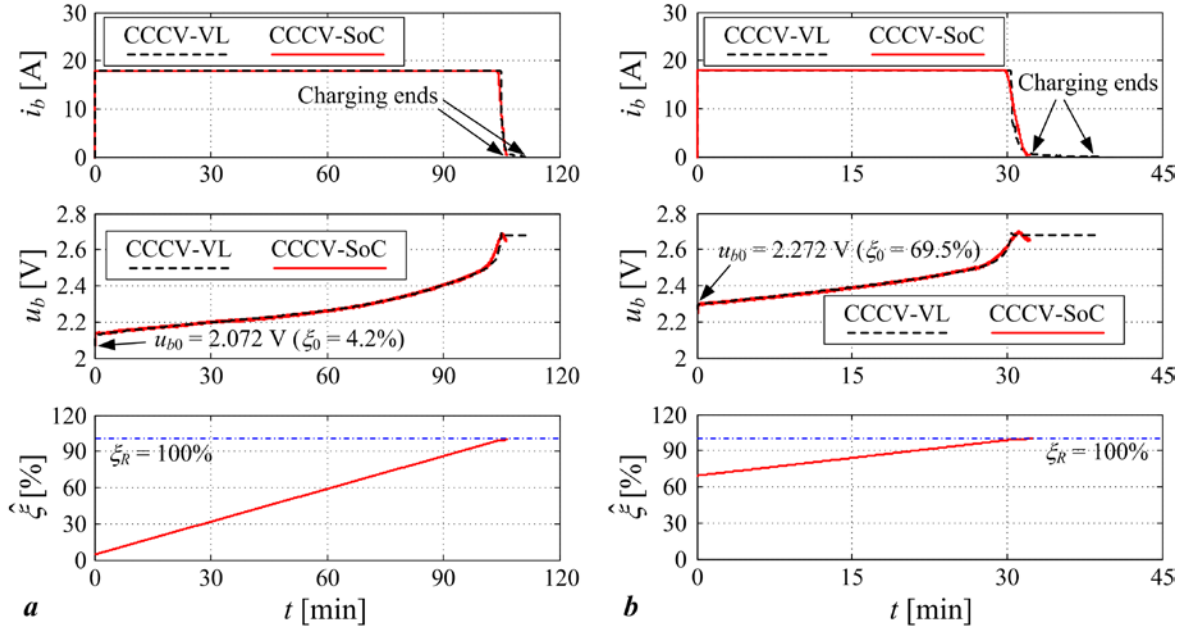


Figure 10. Comparative experimental results of CCCV-VL and CCCV-SoC strategies for 18 A current limit and initial SoC of (a) 4.2% and (b) 69.5%

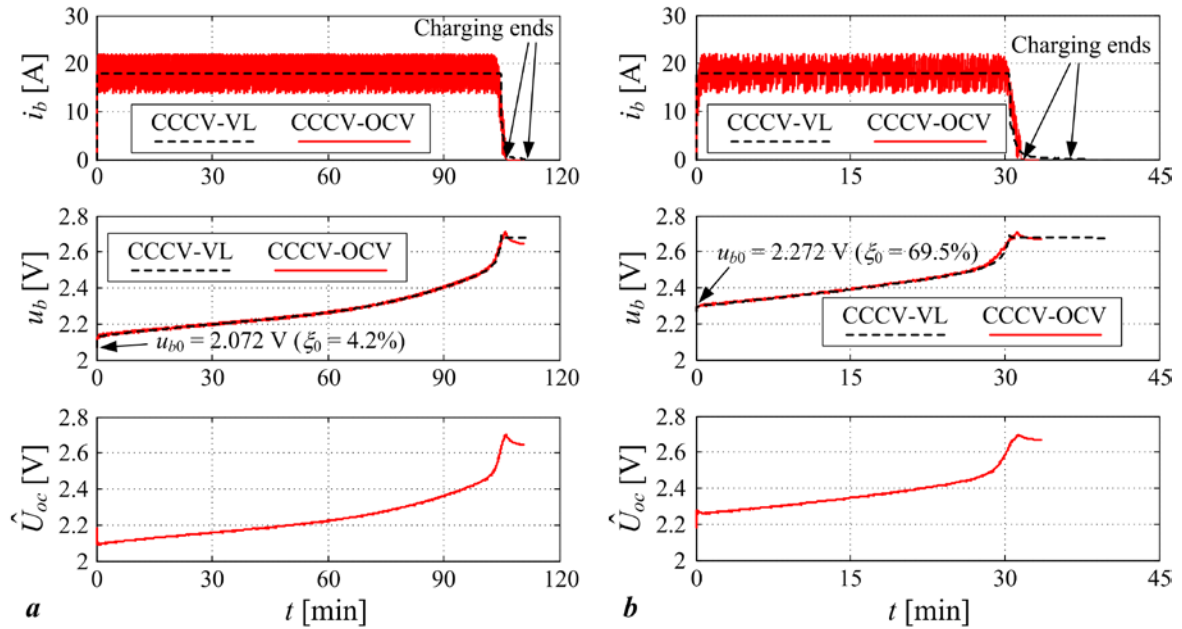


Figure 11. Comparative experimental results of CCCV-VL and CCCV-OCV strategies for 18 A current limit and initial SoC of (a) 4.2% and (b) 69.5%

VII DISCUSSION OF RESULTS

The presented research addresses the inherent limitations of conventional CCCV battery charging systems. By employing more sophisticated model-based adaptive control strategies, such as the proposed EKF-based CCCV-SoC and SRAM-based CCCV-OCV strategy, significant improvements in charging performance can be demonstrated. The core strengths of these adaptive systems lie in their ability to estimate key battery

parameters (SoC or OCV) in real-time using nonlinear estimators. This continuous monitoring enables optimized charging strategies that adapt to the specific battery's characteristics and operating conditions.

Simulation results convincingly illustrate the advantages of the adaptive charging strategies. Both methods exhibit notably faster charging times compared to the conventional CCCV-VL benchmark, particularly at higher charging currents and initial

SoC levels. This speedup highlights the ability of adaptive systems to push operational boundaries while still within safe operating limits. Moreover, both the EKF and SRAM-based charging methods demonstrate remarkable consistency in achieving the desired final SoC, with negligible discrepancies compared to conventional charging. In addition, all three charging strategies have been experimentally verified, and experimental results support the findings of the comprehensive simulation study in terms of charging speed-up when adaptive charging strategies are used. This indicates that adaptive charging strategies could be used in future practical applications.

Despite the clear benefits demonstrated, it is important to acknowledge the potential challenges associated with model-based adaptive charging approaches. Accuracy is dependent on the quality of the underlying battery model, parameter identification, and sensor measurements. Further research could focus on enhancing the robustness of these systems to parameter variations and exploring the inclusion of temperature compensation mechanisms. Additionally, while simulations offer valuable initial insights, experimental validation under real-world conditions will be essential for full technological maturation.

VIII CONCLUSION

The presented work demonstrates the effectiveness of adaptive charging systems in overcoming the limitations of traditional CCCV battery charging approaches. The developed EKF-based CCCV-SoC and SRAM-based CCCV-OCV systems offer a significant improvement in battery charging speed, wherein comprehensive simulations showcase the consistent reduction in charging time while maintaining the desired final SoC levels.

The potential applications of these adaptive methods extend far beyond the initial simulation study. Their ability to optimize charging performance in terms of charging speed while not perceptibly affecting the battery lifespan makes them highly attractive for integration into renewable energy systems, electric vehicles, and other battery-dependent applications. Future work can thus be focused on more extensive field tests and exploration of complementary control techniques that can further unlock the potential of the adaptive model-based charging control systems, with many practical implications such as more efficient and sustainable battery energy storage solutions.

ACKNOWLEDGEMENT

Research supported by the European Commission through the Horizon 2020 project “Maximizing the impact of innovative energy approaches in the EU islands” (INSULAE).

REFERENCES

- [1] Zakariazadeh, A., Ahshan, R., Al Abri, R., Al-Abri, M. Renewable energy integration in sustainable water systems: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 18, No. 100722, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100722>
- [2] Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, Z.A., Salman, H.M., Jaszczur, M. A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications, *Results in Engineering*, Vol. 20, No. 101621, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>
- [3] Shokri, A., Fard, M.S. A sustainable approach in water desalination with the integration of renewable energy sources: *Environmental engineering*

- challenges and perspectives, *Environmental Advances*, Vol. 9, No. 100281, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100281>
- [4] Neri, A., Butturi, M.A. Lolli, F., Gamberini, R. Inter-firm exchanges, distributed renewable energy generation, and battery energy storage system integration via microgrids for energy symbiosis, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 414, No. 137529, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137529>
- [5] Pavković, D., Lbrović, M., Hrgetić, M., Komljenović, A., Smetko, V. Battery current and voltage control system design with charging application, In *Proc. IEEE Conference on Control Applications (CCA 2014)*, Juan Les Antibes, France, pp. 1133-1138, 11 December 2014. <https://doi.org/10.1109/CCA.2014.6981481>
- [6] Kandasamy, V., Venkatesan, M. Adaptive electric vehicle charging method to improve the battery life, In *Proc. 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, Coimbatore, India, pp. 1-4, 16-17 June 2023. <https://doi.org/10.1109/ICAECA56562.2023.10200210>
- [7] Dubarry, M., Qin, N., Brooker, P. Calendar aging of commercial Li-ion cells of different chemistries – A review, *Current Opinion in Electrochemistry*, Vol. 9, pp. 106-113, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.05.023>
- [8] Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., Tavajohi, N., Li, B. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards, *Journal of Energy Chemistry*, Vol. 59, pp. 83-99, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>
- [9] Pozzi, A., Raimondo, D.M. Stochastic model predictive control for optimal charging of electric vehicles battery packs, *Journal of Energy Storage*, Vol. 55, Part A, No. 105332, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105332>
- [10] Xie, S., Hu, X., Qi, S., Tang, X., Lang, K., Xin, Z., Brighton, J. Model predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles considering optimal battery depth of discharge, *Energy*, Vol. 173, pp. 667-678, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.074>
- [11] Hsieh, G.C., Chen, L.R., Huang, K.S. Fuzzy-controlled li-ion battery charge system with active state-of-charge controller, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 3, pp. 585-593, 2001. <https://doi.org/10.1109/41.925585>
- [12] Fan, Y., Wu, J., Chen, Z., Wu, H., Huang, J., Liu, B. Data-driven state-of-charge estimation of lithium-ion batteries. In *Proc. 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA 2020)*, Hong Kong, China, pp. 1-5, 07-10 December 2020. <https://doi.org/10.1109/PESA50370.2020.9344017>
- [13] Jiang, L., Huang, Y., Li, Y., Yu, J., Qiao, X., Huang, C., Cao, Y. Optimization of variable-current charging strategy based on SOC segmentation for Li-ion battery, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 622-629, 2021. <https://doi.org/10.1109/ITITS.2020.3006092>
- [14] Vo, T.T., Chen, X., Shen, W., Kapoor, A. New charging strategy for lithium-ion batteries based on the integration of Taguchi method and state of charge estimation, *Journal of Power Sources*, Vol. 273, pp. 413-422, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.108>
- [15] Chen, Z., Xia, B., Mi, C. C., Xiong, R. Loss-minimization-based charging strategy for Lithium-Ion battery, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 5, pp. 4121-4129, 2015. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2417118>
- [16] Liu, K., Li, K., Ma, H., Zhang, J., Peng, Q. Multi-objective optimization of charging patterns for lithium-ion battery management, *Energy Conversion and Management*, Vol. 159, pp. 151-162, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.092>
- [17] Lee, K.T., Dai, M.J., Chuang, C.C. Temperature-compensated model for Lithium-Ion polymer batteries with extended Kalman Filters State-of-charge estimation for an implantable charger, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 1, pp. 589-596, 2018. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2721880>
- [18] Xiong, R., He, H., Sun, F., Zhao, K. Evaluation on state of charge estimation of batteries with adaptive extended Kalman filter by experiment approach, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, No. 1, pp. 108-117, 2013. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2222684>
- [19] He, H., Xiong, R., Zhang, X., Sun, F., Fan, J. State-of-Charge Estimation of the Lithium-Ion Battery Using an Adaptive Extended Kalman Filter Based on an Improved Thevenin Model, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 4, pp. 1461-1469, 2011.

- <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2132812>
- [20] Sepasi, S., Ghorbani, R., Liaw, B. Y. Improved extended Kalman filter for state of charge estimation of battery pack, *Journal of Power Sources*, Vol. 255, pp. 368-376, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.12.093>
- [21] Di Domenico, D., Stefanopoulou, A., Fiengo, G. Lithium-Ion Battery State of Charge and Critical Surface Charge Estimation Using an Electrochemical Model-Based Extended Kalman Filter, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 132, No. 6, 061302-1, 2010. <https://doi.org/10.1115/1.4002475>
- [22] Othman, B.M., Salam, Z., Husain, A. R. A computationally efficient adaptive online state-of-charge observer for Lithium-ion battery for electric vehicle, *Journal of Energy Storage*, Vol. 49, No. 104141, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104141>
- [23] Pavković, D., Kasać, J., Krznar, M., Cipek, M. Adaptive constant-current/constant-voltage charging of a battery cell based on cell open-circuit voltage estimation, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 14, No. 6, pp. 155, 2023. <https://doi.org/10.3390/wevj14060155>
- [24] He, J., Meng, S., Yan, F. A comparative study of SOC estimation based on equivalent circuit models, *Frontiers in Energy Research*, Vol. 10, No. 914291, 2022. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.914291>
- [25] Pavković, D., Premec, A., Krznar, M., Cipek, M. Current and voltage control system designs with EKF-based state-of-charge estimator for the purpose of LiFePO₄ battery cell charging, *Optimization and Engineering*, Vol. 23, pp. 2335-2363, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11081-022-09728-1>
- [26] GWL/Power Group, SE100AHA cell specification. <http://www.ev-power.eu/CALB-40Ah-400Ah/SE100AHA-Lithium-Cell-LiFePO4-3-2V-100Ah.html> [pristupljeno 20.02.2024]
- [27] Nemeth, T., Schröer, P., Kuipers, M., and Sauer, D. U. Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications - Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations, *Journal of Energy Storage*, Vol. 31, No. 101656, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101656>
- [28] Kvaternik, K., Pavković, D., Kozhushko, Y., Cipek, M., Krznar, M. Lithium-Titanate Battery Cell Experimental Identification and State-of-Charge Estimator Design, In *Proc. 18th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES 2023)*, Dubrovnik, Croatia, No. 36, 24-29 September 2023.
- [29] VanDerHom, E., Mahadevan, S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation, *Decision Support Systems*, Vol. 145, No. 113524, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- [30] ELERIX EX-30TK Extreme Power LTO Cell, VDA size 173/100, Technical Specification, <https://faktor.de/out/media/ELERIX-EX-T30K-QuickDatasheet.pdf> [pristupljeno 20.02.2024]

AUTHORS

Danijel Pavković – Prof. dr. sc., University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, Croatia, danijel.pavkovic@fsb.unizg.hr, ORCID [0000-0001-8045-5109](https://orcid.org/0000-0001-8045-5109)

Sandra Stanković – MS env. eng., Academy of Applied Technical and Preschool Studies Department of Niš, Niš, Serbia, sandra.stankovic@akademijanis.edu.rs, ORCID [0000-0002-0466-1426](https://orcid.org/0000-0002-0466-1426)

Karlo Kvaternik – mag. ing. mech., AVL-AST d.o.o., Zagreb, Croatia, karlo.kvaternik@avl.com

Nikolina Sitar – mag. ing. mech., Rimac Technology, Sveta Nedelja, Croatia, nikolina.sitar@rimac-technology.com

Mihael Cipek – Doc. dr. sc., University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, Croatia, mihael.cipek@fsb.unizg.hr, ORCID [0000-0002-0611-8144](https://orcid.org/0000-0002-0611-8144)

Adaptivni modeli za poboljšane sisteme punjenja baterija

Rezime - U procesu operativnog delovanja, periodično se javlja potreba za brzim dopunjavanjem baterije iz delimično ispražnjenog stanja, uz striktno poštovanje njenih tehnoloških ograničenja kao što su napon baterije i nominalna kontinuirana struja punjenja. Da bi se postigao ovaj cilj, ovaj rad opisuje sistem dinamičkog punjenja baterije, koristeći povratnu informaciju koju daje procenjivač (estimator) stanja napunjenosti baterije (SoC) ili napona otvorenog kola (OCV) koji je usko povezan sa SoC-om. U prvom slučaju, estimator je realizovan kao prošireni Kalmanov filter (EKF), dok je u drugom slučaju implementiran primenom metodologije Sistemskog referentnog adaptivnog modela (SRAM), čiji je dizajn zasnovan na teoriji stabilnosti Ljapunova. Tako dobijeni inovativni adaptivni punjači baterija upoređuju se sa konvencionalnim sistemom punjenja konstantnom strujom/konstantnim naponom (CCCV), a koji se oslanja isključivo na povratnu vezu po naponu baterije. Sveobuhvatna komparativna analiza je sprovedena kroz opsežne simulacije koristeći model nelinearnog ekvivalentnog kola ćelije litijum-titanat (LTO) baterije.

Ključne reči - Punjenje baterije; stanje napunjenosti; nelinearni procenjivači; prošireni Kalmanov filter (EKF); sistemski referentni adaptivni model (SRAM)

Rapid Decarbonization Roadmap for India Based on Photovoltaic Systems

Om Shankar Dev*, Ilija Batas Bjelic**, Rhythm Singh*

* Department of Hydro and Renewable Energy, Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee, Uttarakhand – 247667, India

** Institute of Technical Sciences of SASA, Knez Mihailova 35/IV, 11000 Belgrade, Serbia

Abstract – According to the Paris Agreement signed by national leaders, the rapid decarbonization roadmap is critical for many citizens worldwide. The burden of saving the climate at acceptable levels urges national energy planning activities accordingly. Currently, India has a fossil fuel dominated power system with a rapid increase in renewable energy installations, namely photovoltaic, in the amount of 10 GW per year. India aims to reach 500 GW of installed electricity capacity from non-fossil fuel sources by 2030. This is a very ambitious target, which would require appropriate planning studies for judicious integration and optimal management of the system. Using Energy PLAN (advanced energy system analysis computer model), the authors created various scenarios involving the integration of the above-mentioned renewable energy based capacities into India's power system. It will provide key insights into the effects of certain policies and scenarios on the future overall energy balance, as well as the environmental (namely CO₂ emissions) and social impact, thus enabling more effective policymaking in this key dimension.

Index Terms – Rapid Decarbonization, Photovoltaic Systems, Renewable Energy, EnergyPlan

I INTRODUCTION

India's power system is a pivotal component of its economic growth, catering to the escalating energy demands driven by rapid industrialization and urbanization. The country's commitment to sustainable development is reflected in its ambitious renewable energy targets, aimed at reducing carbon emissions and enhancing energy security.

India has one of the largest power systems globally, with an installed capacity of approximately 441.3 GW as of 2023. This capacity includes 242 GW from fossil fuels, 8.1 GW from nuclear power, and 190 GW from renewable energy sources. India's renewable electricity generation stands at about 359.8 BU, sourced from solar, hydropower, wind, biomass, and other sources. India has set an ambitious goal of achieving 500 GW of installed electricity capacity from non-fossil fuel sources by 2030. This is a very ambitious target, which requires appropriate planning studies for judicious integration and optimal management of the system [1]. The transition towards renewable energy sources poses significant challenges in terms of energy management and grid stability. Existing systems often lack the necessary tools to effectively integrate variable renewable energy sources like solar and wind [2].

The primary objective of this paper is to analyse India's current share in renewable electricity generation, the installed capacity of various renewable sources, and the projected targets for 2030. Using the Energy PLAN model, this study compares the renewable energy shares for 2023 and 2030. With the help of different scenarios we will see how solar photovoltaic (PV) capacity affects the country's net CO₂ emissions.

II LITERATURE REVIEW

While a multitude of references are available in the literature, we have carefully selected a few that bear particular significance, in order to provide a more focused and nuanced analysis.

Population of India is growing at rapid pace along with its energy demand; this has caused greenhouse gas emissions to rise drastically. It's estimated that in the next years, energy exhaustion and GHG emissions might increase by 37%. Solar photovoltaic is being used to meet the nation's enormous increase in energy consumption. India now has one of the fastest-growing industries both domestically and internationally thanks to the manufacture and installation of PV systems. But effective deployment of PV technology in India faces some obstacles which includes low capacity utilization factor of PV plant [3].

Complete energy system, including the demands for industry, transportation, heating, cooling, and electricity, should be examined by the energy system analysis tool. Moreover, prospective system effects of system integration can be examined by doing hourly analysis over the full year. To guarantee that the entire energy system transitions to renewable energy, the planners and researchers should select an energy system analysis tool like EnergyPlan that can perform these tasks [4].

India can become 100% renewable energy based by 2050. This system will be mostly based on solar PV with battery storage. Batteries will be used to provide power supply when needed [5]. India's fully sustainable electrical grid will be based mostly on solar photovoltaic cells and batteries. In addition, prosumers will play an important role by contributing to the power generation. By maximizing their self-consumption, PV prosumers in India can significantly lower their annual electricity expenses. Levelized cost of energy for India's fully sustainable energy system in 2050 are estimated to be 52 €/MWh for the power and 46 €/MWh for the integrated scenarios [6].

Bjelic et. al. (2020) has obtained results for various regions by simulating various flexibility options for smooth penetration of variable renewable energy. They have used sector coupling

approach for managing variability. Large-scale PV and wind energy integration should be followed globally by electrification. Sector coupling is important for achieving net zero carbon system for example coupling of transportation sector with power generation sector. Hourly energy balance is ensured by simulation, meaning that production and consumption are equal throughout each hour. Consequently, each plant type's actual capacity factors are obtained.

Power generation from solar photovoltaic system produces less than one-fourth of greenhouse gases in comparison to that of fossil fuel-based steam turbine power generation [4].

Accurate assessment of real-time data is essential for long-term energy predictions. Potential errors and the lack of necessary data are the prominent limiting factors that affects the forecasting model's accuracy [7].

Global economic fluctuations can affect long-term energy predictions. Recessions and economic booms are examples of such external economic events that might affect energy pricing and demand, creating uncertainties that affect the forecasting accuracy [4].

Research shows that while commitment to rapid decarbonization at the national level generally indicate a favourable growth trajectory, but there are some distributive effects on GDP and employment [3].

III THEORETICAL BACKGROUND

Energy PLAN can function in both economic and technical simulation modes. We have used technical simulation in this investigation. Energy PLAN prioritizes units according to fuel efficiency while making maximum use of locally produced energy. This means that the need for electricity is first met by VRE (variable renewable energy) source power plants, followed by combined heat and power plants, and at last by electricity imports, and power plants [8]. Energy PLAN has been proven for use in long-term energy planning exercises [9] among many other tools i.e. [10].

Due to the country's high solar irradiance profile and 290–300 days of sunshine each year, India has a very large potential for solar energy. Because of this there is continuous growth in installation of solar photovoltaic systems. India has set a target of 280 GW of solar PV capacity by the year of 2030. For such high target in long-term planning exercises all possible realizations of PV including the rooftop mounted [11] share [12] should be explored.

A Installed Capacity and Generation till 2023

As of 2023, the distribution of India's power generation capacity is as follows [13]:

Table 1. Distribution of India's generation capacity

Sources	Capacity (MW)	CUF	Generation (GWh)
Fossil fuels	242,617	0.62	1,323,580
Nuclear	8,180	0.67	47,817
Renewable	190,572	0.21	359,810

Source: India Climate and Energy Dashboard (ICED), NITI aayog (Apex public policy think tank of the Government of India) [11][13]

Contribution of Renewable Energy Sources is as follows:

- Solar Energy is the leading contributor to India's renewable energy mix, with an installed capacity of around 81,813 MW and a generation of 115,975 GWh. India's geographical location offers abundant solar potential, and the government has implemented various policies to promote solar energy deployment;
- Wind Energy is the second-largest contributor, with an installed capacity of 45,886 MW and generating 83,307 GWh. India's favourable wind conditions, particularly in coastal and high-altitude regions, support substantial wind energy production;
- Hydropower projects contribute 46,928 MW of installed capacity and generate 134,053 GWh. These projects are vital for providing energy to remote and hilly areas;
- Biomass energy, including biogas and waste-to-energy projects, has an installed capacity of 10,941 MW and generates 16,989 GWh. Biomass utilization is significant in rural areas, where agricultural residues and organic waste are plentiful.

The projected renewable energy mix for 2030 involves (Table 2):

- Solar Energy- India is projected to install over 280 GW of solar capacity by 2030. This ambitious target aligns with India's commitment to increase the share of renewable energy in its total energy mix and reduce carbon emissions.
- Wind Energy - India aims to achieve around 140 GW of wind power capacity by 2030. This target is part of the broader goal to achieve 500 GW of total renewable energy capacity from non-fossil fuel sources by 2030.
- Hydro - Ministry of Power has outlined plans to increase the total installed hydro capacity to around 70 GW by 2030. This includes both large hydro projects and small hydro projects. As of 2023, India's installed hydro capacity stands at approximately 46.85 GW, indicating a planned addition of about 23.15 GW over the next seven years.
- Biomass - India's target of 10 GW of biomass installed capacity has already been achieved.

Table 2. Distribution of India's renewable capacity

Sources	Capacity (MW)	CUF	Generation (GWh)
Solar	81,813	0.16	115,975
Wind	45,886	0.21	83,307
Hydro	46,928	0.33	134,053
Biomass	10,941	0.18	16,989

Source: India Climate and Energy Dashboard (ICED), NITI aayog (Apex public policy think tank of the Government of India) [11][13]

Target of 500 GW for year 2030 will have a major share of solar PV that is 280 GW, which is more than half of the set target. This is due to the fact that it is easy to set-up solar plant in comparison to other sources.

B Future Renewable Energy Target (2030)

India aims to achieve 500 GW of installed capacity from non-fossil fuel sources by 2030 [13]. This target includes significant expansions in solar, wind, and other renewable energy capacities.

Table 3. Projected renewable energy mix

Sources	Target (GW)
Solar	280
Wind	140
Hydro	70
Biomass	10

Source: Central Electricity Authority (CEA) [13]

IV METHODOLOGY

Energy PLAN is a deterministic model, meaning it always yields the same results when given the same input. General inputs include fuel, heating, and electricity demands, energy technology [14]. The model generates a variety of outputs, such as emissions, excess electricity, hourly or annual electricity generation, and economic variables.

Initially, the systems should be developed to fulfil their role in meeting the national target, in accordance with the guiding principle of the design of energy systems for sustainable future. Additionally, this needs to contribute to achieving global strategies [15].

A. Data Collection

Gathering data on current energy capacities, generation, and consumption patterns. In this research we have collected data of installed capacities and generations from different fuel sources from India Climate and Energy Dashboard (ICED) by NITI Aayog (Apex public policy think tank of the Government of India).

Firstly we have developed India's energy model for year 2023 from the collected data. After that we have developed the energy model for 2030 following the 500 GW target of India. For year 2030 data is referred from Central Electricity Authority (CEA) and Ministry of New Renewable Energy (MNRE).

B. Scenario Development

a) Creating scenarios for 2023 and 2030 based on projected capacities and generation targets. This involves the following:

- Demand input: Electricity demand is 1,531 TWh/year and 14 TWh/year is electricity required for transportation.
- Supply input: We enter installed capacity in 217,589 MW of fossil fuel-based plant along with plants efficiency.
- Variable Renewable Energy Input: Capacity of all renewable energy sources are entered along with the distribution profile. Distribution file contains hourly generation for a complete year, which means it contains 8,784 data points. Wind capacity is 32,848 MW, photovoltaic 82,637 MW, and river hydro is 21,500 MW.

b) Creating scenario of different solar PV capacity for 2030 of the following cases:

1. India is able to achieve 25% more than the target capacity which is 350 GW.
2. India falls short of target by 25% and is only able to achieve 210 GW in year 2030.
3. India falls short of target by 50% and is only able to achieve 140 GW in year 2030.

V RESULTS

Simulation and Analysis: Model is run using run (screen) option to obtain the results.

A base scenario for 2023

This section presents the results for the energy model of year 2023. The analysis of the model suggests that among the 100% primary energy supply of India, 15.1% is provided by renewable energy sources. Renewable energy based generation is responsible for supplying 23.5% of total electricity demand of country which is equivalent to 385.07 TWh. CO₂ emissions associated comes out to be 1589 Mt.

Future energy for 2030

This section presents the results for the energy model of year 2030. This model shows that among the 100% primary energy supply of India, 24.2% will be contributed by renewable. It shows that renewable energy based generation will supply 45.4% of total electricity demand in 2030 which is equivalent to 1149 TWh.

Variation 1 25% more Solar PV capacity

In this section we examine a hypothetical case in which solar PV capacity exceeds the target of 280 GW in 2030 by 25%. Fig 1 shows that primary energy supply from renewable will be increased to 26%. From Fig 2 we can see that electricity generation from renewable sources will be 50.7%. Fig 3 shows that the carbon dioxide emission will be reduced to 1,525 Mt which is lower than the values of 2023.

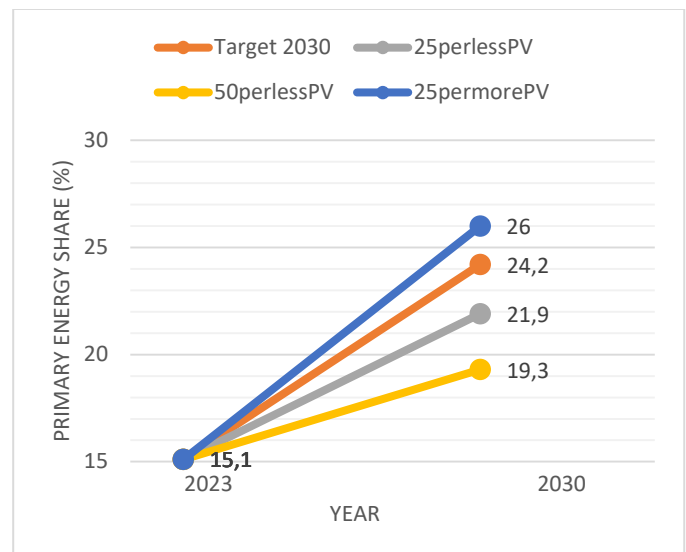


Fig 1. Primary energy share

Variation 2 25% less Solar PV capacity

In this section we examine the case in which India is able to achieve only 75% of targeted capacity of solar PV which is 210 GW by 2030. Fig 4 shows that the primary energy share of renewable sources has fallen to 21.9%. From Fig 5 we can see that contribution in electricity generation from renewable sources has also reduced to 39.2%.

Variation 3 50% less Solar PV capacity

This result is based on the model in which India achieves only 50% of targeted solar PV capacity by 2030 which is 140 GW. Fig 4 shows that the primary energy share of renewable sources has fallen to 19.3%. From Fig 5 we can see that contribution in electricity generation from renewable sources has reduced to 32.9%.

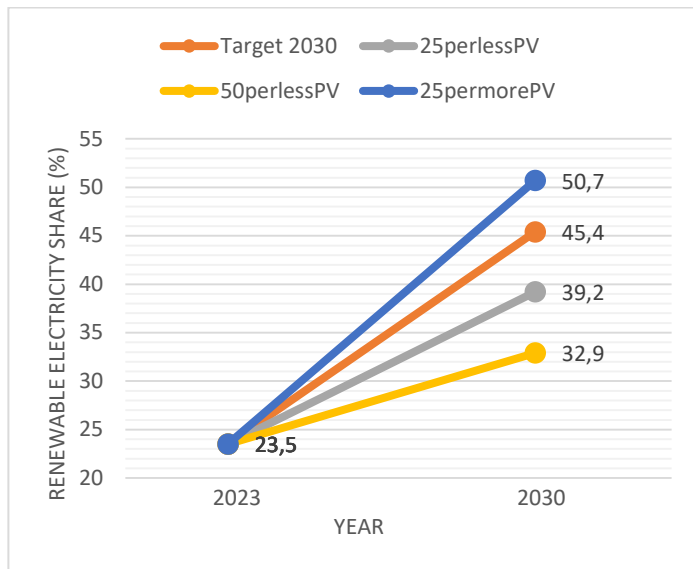


Fig 2. Renewable Electricity Share

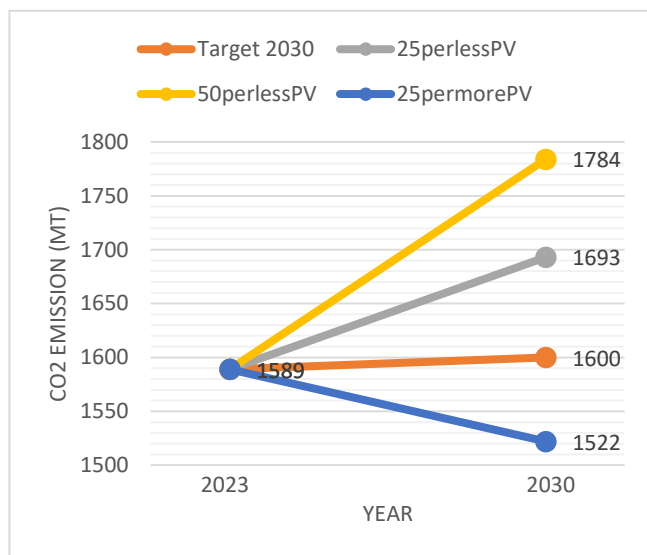


Fig 3. CO₂ Emission (Mt)

V CONCLUSION

Based on our study of different scenarios we have reached to following conclusions:

- Future scenario variant 1 for 2030 suggest that India will be able to meet 45.4% of its electricity demand from renewable generation sources. This is less than the target of 50% of renewable energy share set by Indian government.
- In case of 25% more Solar PV capacity installation, share of renewable electricity generation will be 50.7% which surpass the target of 50% set by Indian government for 2030.
- CO₂ emissions in 25% more solar PV model are the lowest among all the models, and comes out to be 1522 Mt. It is also lower than that of the year 2023. It shows that the installation of more solar photovoltaic can help India for its goal of rapid decarbonization.
- In 50% less PV model CO₂ emission are the highest among all, which is 1784 Mt. This suggests that country's net carbon emission and solar PV concentration are related.
- From the three solar PV scenarios it is concluded that CO₂ emissions increase with decrease in solar PV capacity and is found highest in the scenario of 50% less solar PV model, and lowest in 25% more PV model.
- By analysis of all the scenarios we can see how important solar photovoltaic are for lowering CO₂ emissions and moving India closer to a low-carbon future. The differences in amount of CO₂ emission reveal the unique challenges and opportunities that India has to overcome in order to achieve rapid decarbonisation. For the purpose of creating efficient energy policies, policymakers, energy planners, and interested parties will find this comparison analysis to be an invaluable tool.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Batas-Bjelić, I., Rajaković, N., Pfeifer, A., Herc, L., Duić, N. Flexibility Options in 100% Renewable Energy World Regions, in Proc. 16th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems – SDEWES, Dubrovnik, Croatia, 0064, 10-15 October 2020.
- [2] Thellufsen, J., Lund, H., Sorknæs, P., Østergaard, P., Chang, M., Drysdale, D., Nielsen, S., Djørup, S., Sperling, K. Smart energy cities in a 100% renewable energy context, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 129, 109922, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109922>
- [3] Vecchi, A., Davis, D., Brear, M., Aye, L. Least-cost solutions to household energy supply decarbonisation in temperate and sub-tropical climates, Journal of Cleaner Production, Vol. 448, 141465, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141465>
- [4] Joshi, S., Mukhopadhyay, K. Cleaner the better: Macro-economic assessment of ambitious decarbonisation pathways across Indian states, Renewable and Sustainable Energy Transition, Vol. 2, 100027, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2022.100027>
- [5] Dasgupta, S., Sankhyayan, P. A narrative analysis of state-level renewable energy policies in India, in: Agarwal, A.K. (Ed.), *Energy, Environment, and Sustainability*, pp. 137-148, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7509-4_8
- [6] Gulagi, A., Bogdanov, D., Breyer, C. The role of storage technologies in energy transition pathways towards achieving a fully sustainable energy system for India, Journal of Energy Storage, Vol. 17, pp. 525-539, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.012>
- [7] Ahmad, T., Chen, H., Huang, R., Yabin, G., Wang, J., Shair, J., Azeem Akram, H. M., Hassnain Mohsan, S. A., Kazim, M. Supervised based

- machine learning models for short, medium and long-term energy prediction in distinct building environment, *Energy*, Vol. 158, pp. 17-32, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.169>
- [8] Chang, M., Thellufsen, J.Z., Zakeri, B., Pickering, B., Pfenninger, S., Lund, H., Østergaard, P. A. Trends in tools and approaches for modelling the energy transition, *Applied Energy*, Vol. 290, 116731, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116731>
- [9] Prina, M. G., Lionetti, M., Manzolini, G., Sparber, W., Moser, D. Transition pathways optimization methodology through EnergyPLAN software for long-term energy planning, *Applied Energy*, Vol. 235, pp. 356-368, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.099>
- [10] Chaushovski, A., Nikolova-Poceva, S. Dugoročno planiranje makedonskog sistema snabdevanja električnom energijom, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 85-92, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.85C>
- [11] Agarwal, U., Rathore, N.S., Jain, N., Sharma, P., Bansal, R.C., Chouhan, M., Kumawat, M. Adaptable pathway to net zero carbon: A case study for Techno-Economic and Environmental assessment of Rooftop Solar PV System, *Energy Reports*, Vol. 9, pp. 3482-3492, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.02.030>
- [12] Đurišić, Ž., Škrbić, B. Potencijal energije sunca i vetra za strateško planiranje dekarbonizacije proizvodnje električne energije u Srbiji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 1-11, 2022., <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.01D>
- [13] India Climate & Energy Dashboard, <https://iced.niti.gov.in/energy/electricity/generation/capacity> [pristupljeno 5.02.2024]
- [14] Lund, H., Thellufsen, J. Z., Østergaard, P. A., Sorknæs, P., Skov, I. R., Mathiesen, B. V. EnergyPLAN - Advanced analysis of smart energy systems, *Smart Energy*, Vol. 1, 100007, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100007>
- [15] Prina, M. G., Johannsen, R. M., Sparber, W., Østergaard, P. A. Evaluating near-optimal scenarios with EnergyPLAN to support policy makers, *Smart Energy*, Vol. 10, 100100, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100100>

AUTORI/AUTHORS

Om Shankar Dev, Indian Institute of Technology Roorkee, om_sd@hre.iitr.ac.in

Ilija Batas Bjelic, Institute of Technical Sciences of SASA, ilija.batas-bjelic@itn.sanu.ac.rs, ORCID [0000-0002-4747-7186](https://orcid.org/0000-0002-4747-7186)

Rhythm Singh, Indian Institute of Technology Roorkee, rhythm@hre.iitr.ac.in, ORCID [0000-0003-4510-5845](https://orcid.org/0000-0003-4510-5845)

Mapa puta brze dekarbonizacije Indije bazirana na fotonaponskim sistemima

Rezime - Prema Pariskom sporazumu koji su potpisali nacionalni lideri, mapa puta brze dekarbonizacije je kritična za mnoge građane širom sveta. Teret očuvanja klime na prihvatljivom nivou podstiče aktivnosti nacionalnog energetskog planiranja u skladu s tim. Trenutno Indija ima energetski sistem kojim dominiraju fosilna goriva sa brzim porastom instalacija obnovljivih izvora energije, odnosno fotonaponskih, u količini od 10 GW godišnje. Indija ima za cilj da do 2030. dostigne 500 GW instalirane električne energije iz obnovljivih izvora. Ovo je veoma ambiciozan cilj, koji bi zahtevao odgovarajuće studije planiranja za razumnu integraciju i optimalno upravljanje sistemom. Koristeći Energy PLAN (kompjuterski model za naprednu analizu energetskog sistema), autori su kreirali različite scenarije koji uključuju integraciju gore navedenih kapaciteta zasnovanih na obnovljivoj energiji u indijski elektroenergetski sistem. Ovo će pružiti ključni uvid u efekte određenih politika i scenarija na budući ukupni energetski bilans, kao i uticaj na životnu sredinu (odnosno emisije CO₂) i društveni uticaj, čime će se omogućiti efikasnije kreiranje politike u ovoj ključnoj dimenziji.

Ključne reči - brza dekarbonizacija, fotonaponski sistemi, obnovljivi izvori energije, EnergyPlan

Procjena mogućnosti priključenja fotonaponskog sistema na srednjenaponsku distributivnu mrežu primjenom sekvencijalne Monte Carlo simulacije

Predrag Mršić*, Čedomir Zeljković**, Predrag Stefanov***

* Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija; Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Republika Srpska, BiH

** Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Republika Srpska, BiH

*** Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija

Rezime - U radu je razvijen simulator za procjenu mogućnosti priključenja fotonaponskog sistema date snage na unaprijed definisanoj lokaciji srednjenaponske distributivne mreže. Analiza je izvršena korišćenjem sekvencijalne Monte Carlo simulacije kojom se omogućava uvažavanje podataka sa velikim stepenom nesigurnosti, kao što su proizvodnja fotonaponskog sistema i potrošnja. Pored ovoga, sekvencijalna simulacija omogućava da se odrede periodi kada se narušavaju pogonska ograničenja. Za potrebe ove analize u radu je dat prijedlog probabilističkog modela vremenskih serija proizvodnje sistema i dijagrama potrošnje. Na bazi rezultata različitih radnih režima određene su raspodjele vjerovatnoće pojave vrijednosti napona u pojedinim tačkama mreže, opterećenja vodova, sa vjerovatnoćama prekoračenja pogonskih ograničenja. Baziran na ovim pokazateljima definisan je prijedlog postupka za procjenu prihvatljivosti priključenja željenog fotonaponskog sistema na posmatranu mrežu. Proračun tokova snaga je izvršen u OpenDSS simulatoru, a priprema vremenskih serija ulaznih podataka za simulaciju izvršena je u programskom paketu Matlab. Razvijeni metod je testiran na primjeru IEEE mreže sa 33 čvora.

Ključne reči - Distributivna mreža, PV sistem, procjena mogućnosti priključenja, sekvencijalna Monte Carlo simulacija

I UVOD

Distributivne mreže su, u prošlosti, razvijane za prenos električne energije od prenosne mreže ka potrošačima, odnosno za tok energije u jednom smjeru. Razvojem distribuiranih izvora (engl. *Distributed Generation* – DG) električne energije, u prvom redu fotonaponskih (engl. *Photovoltaic* – PV) sistema, koji su manjih snaga i po prirodi se priključuju na distributivnu mrežu, mijenja se prvobitna namjena distributivnih mreža. Distributivne mreže sada treba da prenose energiju u oba smjera, od prenosne mreže ka potrošačima, ali i od distribuiranih izvora ka prenosnoj mreži u periodima kada je proizvodnja značajna, a potrošnja u distributivnoj mreži minimalna [1]. Prednost lokalne proizvodnje električne energije se prvenstveno ogleda u povećanju pouzdanosti i sigurnosti napajanja potrošača, smanjenju gubitaka u prenosu električne energije i poboljšanju naponskih prilika u mreži [2]. Pored navedenih prednosti, priključenje DG velike snage, bilo na jednu ili više lokacija, može dovesti do narušavanja pogonskih ograničenja mreže i potrebe za proširenjem prenosnih kapaciteta. Da bi se izbjegli dodatni

troškovi potrebni za proširenje prenosnih kapaciteta mreže, potrebno je detaljno analizirati do kakvih promjena će dovesti priključenje DG, te na osnovu toga odrediti da li se DG date snage može priključiti na postojeću distributivnu mrežu ili ne. Za generalizaciju ovog problema uveden je koncept procjene kapaciteta priključenja DG (engl. *hosting capacity*). Kapacitet priključenja DG je definisan kao maksimalna snaga DG koji mogu biti priključeni na distributivnu mrežu a da ne dođe do narušavanja pogonskih ograničenja mreže [1].

Za potrebe planiranja i eksploatacije elektroenergetskih mreža, uključujući i distributivne mreže, osnovne analize se zasnivaju na proračunu tokova snaga i naponskih prilika [3]. Tradicionalni deterministički proračun tokova snaga se vrši na osnovu poznate topologije mreže i poznatih snaga proizvodnje i potrošnje. Zbog prirode primarnih izvora DG, proizvodnja se stohastički mijenja, te deterministički pristup nije odgovarajući. Stoga je za analizu pogonskih stanja u mrežama u kojima se pojavljuju DG, koji posjeduju određenu neizvjesnost proizvodnje, potrebno koristiti probabilističke tokove snaga [4].

Probabilistički tokovi snaga su se pojavili ranih sedamdesetih godina dvadesetog vijeka [5]. Od tada, su razvijeni različiti matematički metodi za rješavanje problema probabilističkih proračuna tokova snaga. Jedan skup metoda koje se koriste za rješavanje problema probabilističkih tokova snaga je baziran na primjeni diskretne konvolucije [6] i alternativnih metoda koje uključuju Fourier-ovu transformaciju [7] i Von Mises metod [8]. Najčešće korišćena matematička metoda za rješavanje problema probabilističkih tokova snaga je nesekvencijalna Monte Carlo simulacija zasnovana na jednostavnom nasumičnom izvlačenju promjenljivih iz odgovarajućih raspodjela [9]. Takođe postoje i metodi u kojima se kombinuje Monte Carlo simulacija i konvolucija. Za ocjenu različitih metoda ne postoje jedinstveni kriterijumi, pa se kompromis bira između brzine proračuna i tačnosti. Monte Carlo metoda se izdvaja kao tačna, fleksibilna i robusna metoda ali je za postizanje visoke tačnosti potreban veliki broj proračuna, što povećava vrijeme trajanja simulacije. Iako se izvršava veliki broj proračuna tokova snaga, prethodne metode ne omogućavaju da se identifikuje period kada bi potencijalno došlo do narušavanja pogonskih ograničenja mreže.

Ideju za koncept procjene kapaciteta mogućeg priključenja DG na mrežu je predstavio Andre Even, a Math Bollen je 2011. godine jasno definisao koncept [10]. U radu [11] je predstavljen

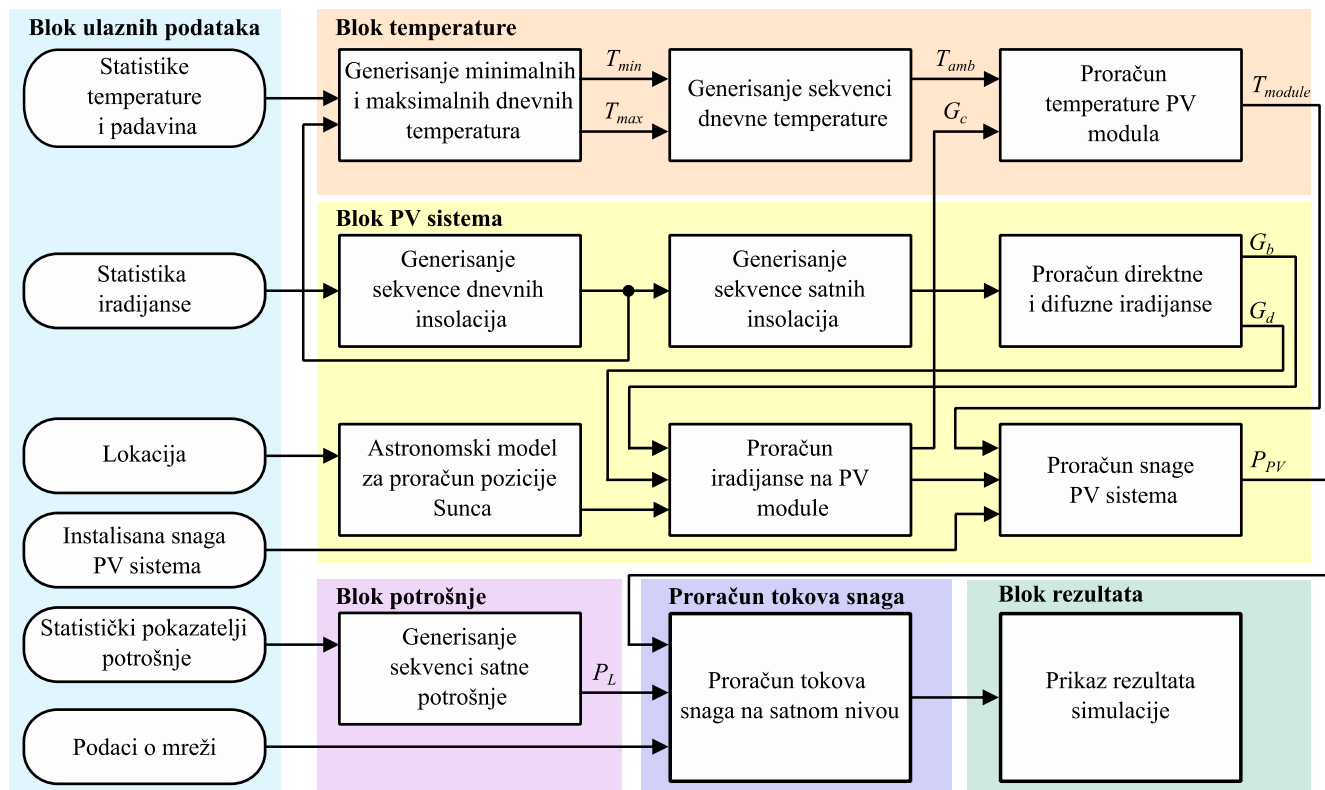
jedan način za procjenu vršne snage PV sistema koji se može priključiti na distributivnu mrežu, a da ne dođe do narušavanja pogonskih ograničenja. Analiza se vrši na osnovu Monte Carlo simulacije. Prvo se vrši procjena proizvodnje PV sistema i procjena potrošnje na osnovu odgovarajućih funkcija raspodjele vjerovatnoće, a zatim se vrši proračun tokova snaga na nivou sata. Takođe, koristeći Monte Carlo simulaciju za probabilistički proračun tokova snaga u [12] se proračunava maksimalna snaga DG. Uticaj topologije srednjenaponske i niskonaponske mreže na kapacitet mogućeg priključenja DG je analiziran u radu [13]. U [14] se procjena kapaciteta mogućeg priključenja PV sistema u distributivnu mrežu vrši samo na osnovu parametara distributivne mreže i podataka o naponu u priključnoj tački. Stohastički višekriterijumski model za maksimizaciju kapaciteta mogućeg priključenja DG i minimizaciju troškova za energiju u mreži sa integrisanim vjetroagregatima prikazan je u radu [15].

Proizvodnja PV sistema zavisi od niza promjenljivih koje se mijenjaju tokom vremena što dovodi do toga da se proizvodnja PV sistema stohastički mijenja. Pored proizvodnje PV sistema, mijenja se i potrošnja. Iako se radi o slučajnim promjenljivim, promjenljive su vremenski zavisne. S druge strane, za pravilan rad distributivne mreže je bitno da ni u jednom trenutku ne budu narušena pogonska ograničenja mreže. Za detaljnu analizu narušavanja pogonskih ograničenja, potreban je hronološki dijagram promjene ključnih promjenljivih, kao što su proizvod-

nja PV sistema, potrošnja, naponi u čvorovima i struje po granama mreže. Zbog ovoga, metodi zasnovani na nesekven- cijalnoj Monte Carlo simulaciji nisu odgovarajući jer se gubi podatak o vremenu. Da bi se sačuvao podatak o vremenu nastanka nekog događaja, mora se koristiti sekvencijalna Monte Carlo simulacija.

U ovom radu je razvijen simulator za procjenu mogućnosti priključenja PV sistema na distributivnu mrežu zasnovan na sekvencijalnoj Monte Carlo simulaciji. Na osnovu probabilističkog modela, generišu se vremenske serije ambijentalne temperature i iradijance, a zatim, na osnovu njih, vremenske serije proizvodnje PV sistema. U odnosu na [16] i [17] metod za generisanje vremenskih serija ambijentalne temperature je modifikovan tako da se izbjegnu nagle promjene srednje temperature između pojedinih mjeseci. Uzimajući u obzir godišnju, sedmičnu i dnevnu promjenu potrošnje izvršeno je i generisanje vremenskih serija potrošnje.

Ostatak rada je organizovan kako slijedi. U drugom dijelu je detaljno objašnjeno probabilističko modelovanje vremenskih serija. Takođe, objašnjen je način proračuna tokova snaga i prikaz rezultata simulacije. U trećem dijelu je prikazan ilustrativan primjer procjene mogućnosti priključenja PV sistema na distributivnu mrežu. Na kraju je dat zaključak u kome su sumirani rezultati rada i date preporuke za buduća istraživanja.



Slika 1. Blok dijagram simulatora

II MODELOVANJE PROMJENLJIVIH I OPIS SIMULATORA

Blok dijagram probabilističkog simulatora je prikazan na slici 1. U funkcionalnom smislu, simulator je koncipiran tako da se

može uočiti šest cjelina. Ulazni podaci su osnov informacija za simulator i oni su objedinjeni u jedan blok. Da bi se uvažila korelacije između temperature i iradijance, odnosno uticaj temperature okoline na proizvodnju PV sistema prvo su generisane

vremenske serije ambijentalne temperature i iradijance. Zatim se vrši probabilističko modelovanje vremenskih serija proizvodnje PV sistema i potrošnje. Kada se generišu vremenske serije podataka, proračunavaju se tokovi snage i na kraju se prikazuju rezultati proračuna u vidu funkcija vjerovatnoće pojedinih promjenljivih i vjerovatnoće prekoračenja pogonskih ograničenja.

Blok ulaznih podataka

Blok ulaznih podataka obuhvata sve parametre koji se odnose na mrežu, PV sistem i ostale komponente, kao i statističke podatke o potrošnji i meteorološke podatke o temperaturama i padavinama. Parametri mreže su topologija mreže i karakteristike elemenata. Zatim, parametri PV sistema su snaga sistema, orijentacija modula, karakteristike modula, gubici na DC strani sistema i efikasnost invertora. Podaci o lokaciji su obuhvaćeni preko geografske dužine i širine posmatrane lokacije. Meteorološki ulazni podaci su vektori 12 prosječnih mjesečnih vrijednosti: broja dana sa padavinama, minimalnih i maksimalnih dnevnih temperatura, i insolacije. Statistički podaci o potrošnji su: statistička promjena dnevnog vršnog opterećenja u toku godine, statistička promjena dnevnog vršnog opterećenja u toku sedmice i dnevna promjena potrošnje.

Blok PV sistema

U bloku PV sistema se generišu godišnje vremenske serije proizvodnje PV sistema na bazi lokacije sistema i meteoroloških podataka srednjih mjesečnih insolacija na površini zemlje [18]. Podaci se generišu sa rezolucijom od 1 h. Na početku se učitavaju statistički podaci 12 srednjih mjesečnih insolacija za datu lokaciju, koji se mogu preuzeti sa specijalizovanih aplikacija kao što je PVGIS (engl. *Photovoltaic Geographic Information Service*) [19]. Dijeljenjem srednjih mjesečnih insolacija na horizontalnu podlogu sa insolacijom proračunatom van zemljine atmosfere, koja se može analitički izračunati, dobija se mjesečni indeks vedrine. Koristeći mjesečne indekse vedrine i matrice prelaza Markova generišu se sekvence dnevnih indeksa vedrine [20]. Zatim se na osnovu dnevnih indeksa vedrine koristeći vremenski zavisani, autoregresivni, Gausov metod generišu satni indeksi vedrine [21]. Generisani satni indeksi vedrine i iradijansa na horizontalnu podlogu van zemljine atmosfere omogućavaju da se odredi iradijansa na horizontalnu podlogu na površini zemlje. Da bi se na osnovu iradijance mogla procijeniti proizvodnja PV sistema potrebno je prvo proračunati iradijansu u ravni PV modula. Ovdje treba voditi računa da se direktna iradijansa (G_b) i difuzna iradijansa (G_d) ne mogu na isti način svesti u ravan PV modula, pa je prije svođenja iradijance u ravan modula potrebno odrediti direktnu i difuznu iradijansu na horizontalnu podlogu [22]. Direktna komponenta iradijance se svodi u ravan modula koristeći standardne izraze koji uzimaju u obzir položaj Sunca na nebeskoj sferi i orijentaciju PV modula [23], dok se za proračun difuzne komponente koristi Perez-ov anizotropski model [24]. Potrebni uglovi koji definišu položaj Sunca u odnosu na lokaciju PV modula se proračunavaju u astronomskom modelu.

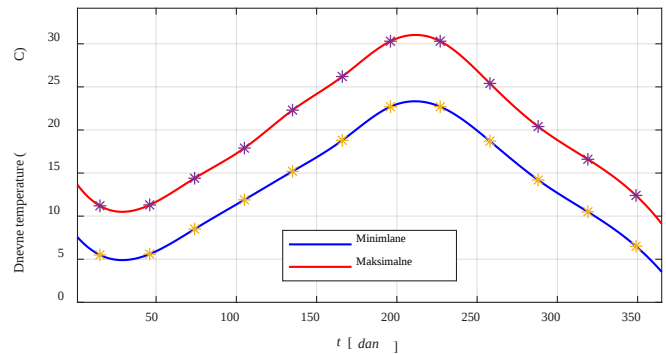
Proračun snage PV sistema se računa na sljedeći način [25]:

$$P_{PV}(t) = P_{PVn} \cdot \eta_{PV} \frac{G_c(t)}{1000} [1 + \gamma \cdot (T_c(t) - 25)], \quad (1)$$

gdje je P_{PVn} nominalna snaga PV sistema, η_{PV} ukupan stepen iskorišćenja (kojim se obuhvataju neusklađenosti modula, ožičenje, spojevi, zaprljanost modula, i dr.), $t \in [1, 8760]$ posmatrani sat u toku godine, $G_c(t)$ iradijansa na module posmatranog sata, γ koeficijent promjene snage PV sistema sa promjenom temperature i $T_c(t)$ temperatura PV ćelije u posmatranom satu.

Blok temperature

Estimacija ambijentalne temperature je urađena u dva koraka. U prvom koraku se proračunavaju minimalne i maksimalne dnevne temperature, a u drugom se na osnovu tih temperatura estimiraju dnevna promjena temperature. Prema [16] i [17] minimalna i maksimalna dnevna temperatura se uzima iz normalne raspodjele za srednju vrijednost i standardnu devijaciju koje zavise od mjesečnih prosjeka minimalne i maksimalne temperature, te mjesečnog prosjeka broja dana sa padavinama. U odnosu na prikazani metod izvršena je interpolacija minimalnih i maksimalnih srednjih mjesečnih temperatura tako da se dobiju srednje minimalne i maksimalne temperature za svaki dan i na osnovu njih se formiraju raspodjele vjerovatnoća za izvlačenje minimalne i maksimalne dnevne temperature. Na ovaj način izbjegava se pojava naglih skokova srednjih dnevnih temperatura pri prelazima između pojedinih mjeseci. Na slici 2 prikazane su prosječne minimalne i maksimalne mjesečne temperature (označeno markerima) i interpolacija tih temperatura polinomom trećeg stepena (puna linija).



Slika 2. Prosječne minimalne i maksimalne dnevne temperature (puna linija) i mjesečne temperature (markeri)

Proračun srednje vrijednosti normalne raspodjele vjerovatnoće maksimalne dnevne temperature zavisi i od toga da li je dan oblačan / sa padavinama ili ne. Maksimalna dnevna temperatura je viša ako je dan vedar i sunčan nego kada je oblačan i pada kiša [17], [26]. Na osnovu prosječne srednje minimalne temperature ($T_{min,d}$) i maksimalne temperature ($T_{max,d}$) određenog dana, prvo se računa razlika tih temperatura:

$$\Delta T = \bar{T}_{max,d} - \bar{T}_{min,d}, \quad (2)$$

zatim se, na osnovu te razlike i vjerovatnoće pojave padavina (PW) računaju srednje vrijednosti normalnih raspodjela maksimalne dnevne temperature za vedar dan ($T_{max,dry}$) i maksimalne dnevne temperature za oblačan dan ($T_{max,wet}$):

$$T_{max,dry} = \bar{T}_{max,d} + 0,25 \cdot PW \cdot \Delta T, \quad (3)$$

$$T_{max,wet} = \bar{T}_{max,d} - 0,25 \cdot \Delta T. \quad (4)$$

Vjerovatnoća pojave padavina se računa iz srednjeg broja kišnih dana po mjesecima:

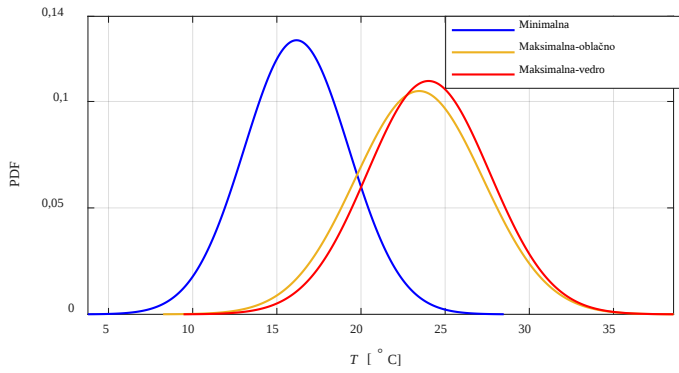
$$PW = \frac{R_m}{D_m}, \quad (5)$$

gdje je R_m broj kišnih dana u mjesecu, a D_m broj dana. Standardne devijacije raspodjela vjerovatnoća minimalne dnevne temperature (σ_{Tmin}), maksimalne dnevne temperature za vedar dan ($\sigma_{Tmax,dry}$) i maksimalne dnevne temperature za oblačan dan ($\sigma_{Tmax,wet}$), se računaju korišćenjem relacija:

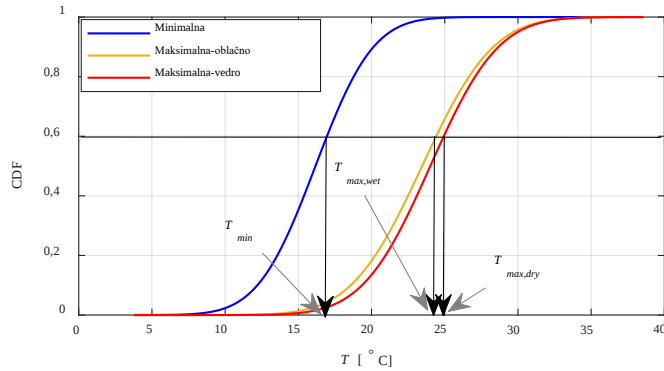
$$\sigma_{Tmin} = \max[0,5; (5,2 - 0,13 \cdot \bar{T}_{min,d})], \quad (6)$$

$$\sigma_{Tmax,dry} = \max[0,5; (5,8 - 0,09 \cdot \bar{T}_{max,dry})], \quad (7)$$

$$\sigma_{Tmax,wet} = \max[0,5; (5,8 - 0,09 \cdot \bar{T}_{max,wet})]. \quad (8)$$



Slika 3. Raspodjele vjerovatnoća minimalne i maksimalne temperature za oblačan i vedar dan

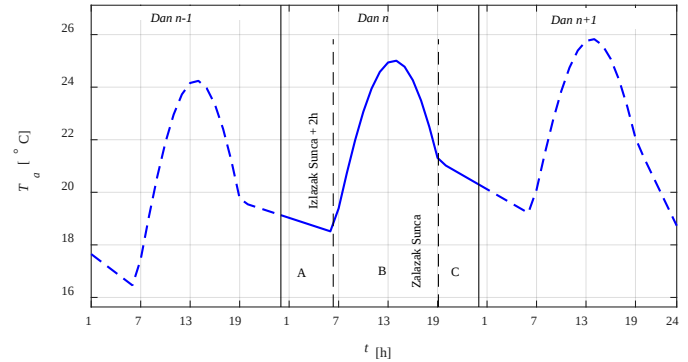


Slika 4. Kumulativne funkcije raspodjela vjerovatnoća minimalne i maksimalne temperature za oblačan i vedar dan

Da li je posmatrani dan vedar ili oblačan određuje se na osnovu dnevnog indeksa vedrine koji se estimira u bloku PV sistema. Ako je dnevni indeks vedrine manji od granične vrijednosti indeksa vedrine smatra se da je dan oblačan, u suprotnom je vedar. Granična vrijednost indeksa vedrine se bira tako da godišnji broj dana sa padavinama, koji se uzima kao ulazni podatak, odgovara prosječnoj vrijednosti broja dana sa padavinama u simulaciji. Funkcije raspodjela gustine vjerovatnoća (engl. *Probability Density Function* – PDF), minimalne i maksimalne temperature za oblačan i vedar dan, su prikazane na slici 3. Sa slike se može

uočiti da postoji određeno preklapanje funkcija raspodjele gustine vjerovatnoća koje može dovesti do toga da se izabere maksimalna dnevna temperatura manja od minimalne dnevne. Da bi se to izbjeglo, a da ne dođe do narušavanja funkcija raspodjele gustine vjerovatnoća, minimalna i maksimalna dnevna temperatura se uzimaju u istom koraku. Prvo se formiraju kumulativne funkcije raspodjele gustine vjerovatnoća (engl. *Cumulative Distribution Function* – CDF), kao na slici 4, a zatim se uzima broj u opsegu između 0 i 1 iz uniformne raspodjele. Presjek horizontalne prave koja odgovara izvučenom broju i kumulativnih funkcija raspodjele vjerovatnoća definiše minimalnu i maksimalnu dnevnu temperaturu. Primjer estimacije dnevne minimalne i maksimalne temperature, za broj 0,6 koji je izvučen iz uniformne raspodjele, prikazan je na slici 4.

Nakon proračuna minimalne i maksimalne dnevne temperature vrši se estimacija promjene dnevne temperature. Dan se podijeli na tri dijela: (A) od ponoći do dva sata nakon izlaska Sunca, (B) ostatak vidljivog dijela dana i (C) period od zalaska Sunca do ponoći. U periodu vidljivog dijela dana, korišćenjem podataka za minimalnu i maksimalnu dnevnu temperaturu vrši se provlačenje sinusne krive, a u ostala dva perioda temperatura se linearno interpolira uzimajući u obzir minimalne i maksimalne temperature prethodnog i narednog dana [27]. Primjer dnevne promjene temperature je prikazan na slici 5.



Slika 5. Estimacija dnevne promjene temperature

Proračun temperature PV modula je izvršen na osnovu nominalne radne temperature PV ćelije. Nominalna radna temperatura PV ćelije je procijenjena za temperaturu ambijenta od 20°C, iradijansu od 800 W/m² i brzinu vjetra od 1 m/s. Da bi se obuhvatile promjene meteoroloških uslova (temperature ambijenta i iradijanse) koristi se sljedeći izraz za procjenu temperature PV ćelije [23]:

$$T_c(t) = T_a(t) + \frac{G_c(t)}{800} (T_n - 20), \quad (9)$$

gdje je $T_a(t)$ temperatura ambijenta posmatranog sata, T_n nominalna radna temperatura PV ćelije i $G_c(t)$ iradijansa na module posmatranog sata.

Blok potrošnje

Dijagrami opterećenja potrošača zavise od tipa potrošača, posmatranog sata u toku dana, dana u toku sedmice i sedmice u toku godine. Hronološki dijagram opterećenja potrošača obično nije dostupan za većinu potrošača, pa se pribjegava sintetičkom

generisanju dijagrama. Jedan način da se vještački generiše hronološki dijagram opterećenja je uvažavanje sljedećih promjena [28], [29]:

- satne promjene opterećenja na nivou dana,
- vršne dnevne promjene opterećenja u toku sedmice i
- vršne sedmične/dnevne promjene opterećenja u toku godine.

Godišnji hronološki dijagram opterećenja, za potrebe simulatora izloženog u ovom radu, se generiše na osnovu sljedećeg izraza:

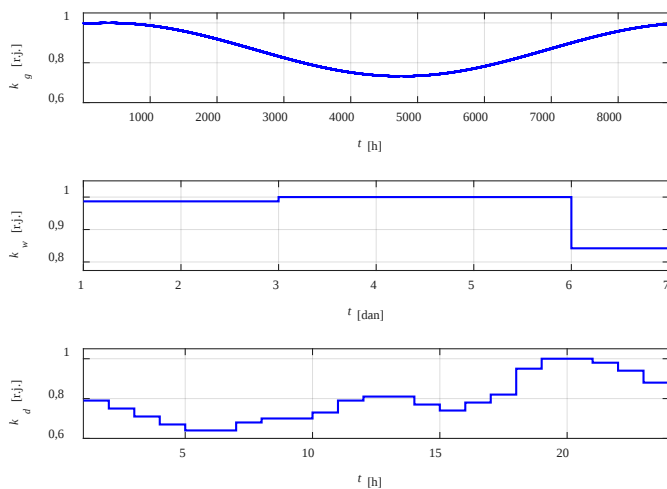
$$S_P(t) = S_m \cdot k_g(t) \cdot k_w(d) \cdot k_d(t) \cdot (1 + 0,05 \cdot N(0,1)), \quad (10)$$

gdje je S_m prosječna godišnja vršna snaga potrošača, $k_g(t)$ koeficijent relativne vršne dnevne promjene opterećenja za posmatrani sat u toku godine, $k_w(d)$ koeficijent relativne vršne dnevne promjene opterećenja u toku sedmice za posmatrani dan, $k_d(t)$ koeficijent relativne dnevne promjene opterećenja za posmatrani sat u toku dana, i $N(0,1)$ slučajni broj izvučen iz normalne raspodjele čija je srednja vrijednost 0, a devijacija 1. Na ovaj način se pored dnevne, sedmične i godišnje promjene opterećenja, uvažava i činjenica da dijagram opterećenja ima stohastički karakter.

Krive dnevne, sedmične i godišnje promjene opterećenja estimiraju se analizom hronološkog dijagrama individualnog potrošača. Jedan primjer datih krivih, koje će se koristiti za generisanje dijagrama opterećenja u ovom radu je prikazan na slici 6. Koeficijent godišnje promjene opterećenja je generisan na osnovu izraza:

$$k_g(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \varphi\right) + O, \quad (11)$$

gdje su koeficijenti $A = 0,1339$, $\varphi = 1,3015$ rad i $O = 0,8660$, a $t \in [1, 8760]$ je posmatrani sat u toku godine [30]. Koeficijenti sedmične promjene opterećenja su preuzeti iz [31], a dnevne promjene iz [32].



Slika 6. Krive godišnje, sedmične i dnevne promjene opterećenja

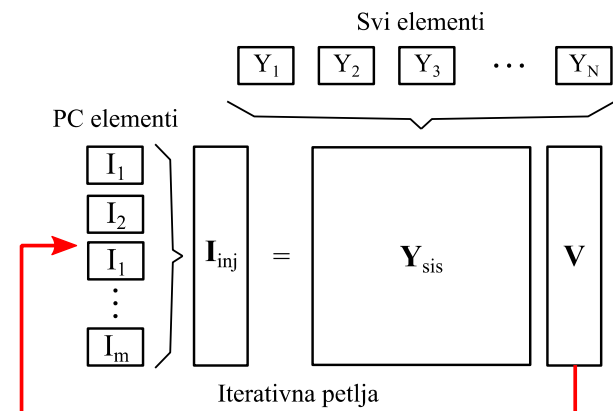
Proračun tokova snaga

Nakon generisanja vremenskih serija proizvodnje PV sistema i potrošnje vrši se proračun tokova snaga korišćenjem OpenDSS-a. Formira se petlja u kojoj se za svaki sat u toku godine,

korišćenjem podataka o proizvodnji PV sistema i podataka o potrošnji u datom satu, vrši proračun tokova snaga i naponskih prilika. Model elektroenergetske mreže se direktno učitava u OpenDSS, a podaci o proizvodnji PV sistema i potrošnji se putem COM interfejsa proslijeđuju iz Matlab-a. Rezultati proračuna se takođe putem COM interfejsa iz OpenDSS šalju u Matlab na obradu.

Proračun tokova snaga se može izvršiti iterativnim ili direktnim proračunom. Pri iterativnom proračunu svi nelinearni elementi se predstavljaju preko struja injektiranja, a pri direktnom proračunu svi elementi se predstavljaju samo preko matrice admitansi. Stoga je direktni proračun manje tačan i koristi se za proračun početnog rješenja u iterativnom procesu. Iterativni proračun se može izvršiti na dva načina, korišćenjem metoda injektiranja struja i Newton-ov metoda. Metoda injektiranja struja je brži, dok je Newton-ov mnogo robusniji i koristi se za kompleksnije proračune. Metoda injektiranja struja je relativno jednostavan iterativni metod fiksne tačke koji daje zadovoljavajuće rezultate za većinu proračuna u distributivnim sistemima u kojima postoji bar jedan stabilan izvor velike snage. Zbog svoje brzine ovaj metod se preporučuje za proračun tokova snaga u sekvencijalnim simulacijama [33], zbog čega je ovaj način proračuna korišćen i u ovom radu.

U OpenDSS-u postoje dvije osnovne grupe elemenata, elementi koji prenose energiju (engl. *Power Delivery Elements*) i elementi koji vrše konverziju električne energije u neki drugi vid ili obrnuto (engl. *Power Conversion Elements*). Elementi koji prenose energiju su standardni elementi mreže koji se mogu modelovati matricom admitansi. Elementi koji vrše konverziju energije (izvori i potrošači) se tipično modeluju Norton-ovim ekvivalentom, tj. konstantnom impedansom i strujnim izvorom. Vrijednost impedanse se, obično, ne mijenja tokom proračuna da se ne bi matrica admitansi sistema mijenjala. Nelinearnost elementa se uvažava promjenom struje strujnog izvora (kompenzacione struje). Nakon formiranja matrice admitansi za sve elemente posebno, formira se matrica admitansi za sistem i vektor struja injektiranja, koji uključuje i kompenzacione struje, te se vrši iterativni proračun. Iterativni proračun se tipično završava kada promjena napona u čvorovima u toku iteracije bude manja od 0,0001 r.j. Principijelna šema iterativnog postupka je prikazana na slici 7.



Slika 7. Principijelna šema iterativnog postupka [33]

Početno rješenje se dobija iz direktnog proračuna $\mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{V}$, gdje

su potrošači i generatori modelovani linearnim pasivnim ekvivalentima. Vektor struja injektiranja zavisi od napona u čvorovima i u svakoj iteraciji se mijenja. U suštini, osnovni zadatak proračuna tokova snaga se svodi na rješavanje nelinearne matrice jednačine:

$$\mathbf{I}_{inj} = \mathbf{Y}_{sis} \mathbf{V}, \quad (12)$$

gdje je $\mathbf{Y}_{sis}$ matrica admitansi sistema, $\mathbf{V}$ matrica napona u čvorovima i $\mathbf{I}_{inj}$ matrica struja injektiranja. Za rješavanje jednačine (12) koristi se metod fiksne tačke koji se može zapisati na sljedeći način [33]:

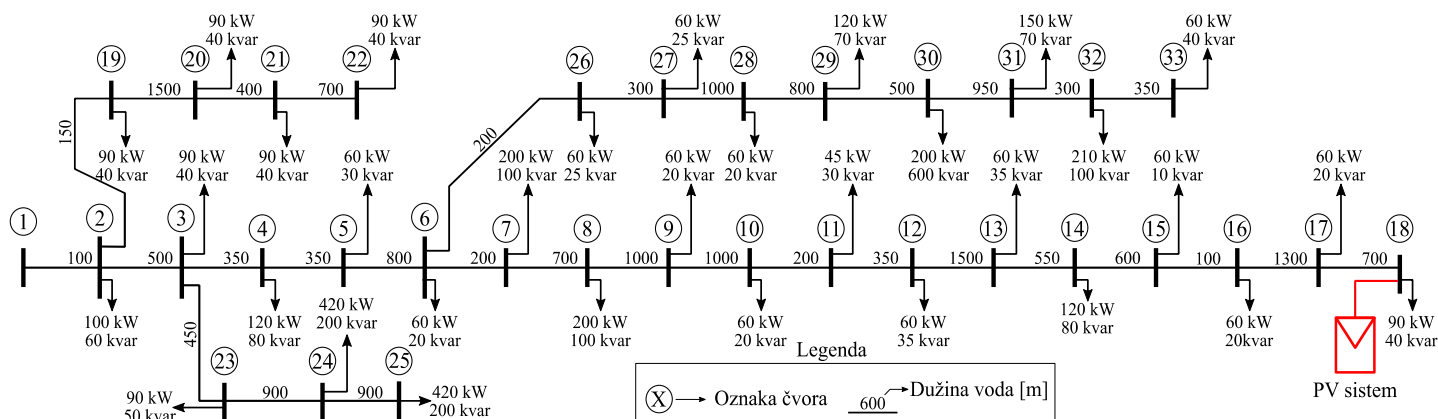
$$\mathbf{V}_{n+1} = [\mathbf{Y}_{sis}]^{-1} \mathbf{I}_{inj}(\mathbf{V}_n). \quad (13)$$

A BLOK REZULTATA

U bloku rezultata se sumiraju svi rezultati, generišu funkcije raspodjela vjerovatnoća napona u čvorovima, struja po granama mreže, te funkcije raspodjele vjerovatnoća narušavanja pogonskih ograničenja. Na osnovu ovih rezultata donosi se odluka o mogućnosti priključenja PV sistema na distributivnu mrežu.

III ILUSTRATIVNI PRIMJER

Razvijeni simulator je testiran na primjeru analize mogućnosti priključenja PV sistema na distributivnu mrežu. Meteorološki podaci kao što su broj dana sa padavinama, minimalne i maksimalne temperature, i insolacije su izabrane za okolinu Trebinja (42,70 N; 18,35 E), Republika Srpska, dok je za mrežu usvojena IEEE mreža sa 33 čvora. Topologija mreže, podaci o dužini vodova, kao i opterećenjima priključenim u čvorove mreže prikazani su na slici 8. Nazivni napon mreže je 12,66 kV, ukupno aktivno opterećenje je 3,715 MW, a reaktivno 2,30 Mvar. Analizira se mogućnost priključenja PV sistema snage 3,5 MWp u čvor 18 distributivne mreže. Meteorološki podaci za datu lokaciju, preuzeti iz meteorološkog atlasa [34] i PVGIS baze podataka [35], prikazani su u tabeli 1. Podaci o opterećenjima priključenim u čvorove mreže koja su data za IEEE mrežu sa 33 čvora se smatraju maksimalnim prosječnim opterećenjima. Promjene opterećenja u toku dana, sedmice i godine se obuhvataju preko koeficijenata koju su dati na slici 6. Ostali fiksni podaci potrebni za simulaciju su prikazani u tabeli 2. Kao kompromis između tačnosti i vremena izvršavanja simulacije, rezultati procjene mogućnosti priključenja PV sistema su bazirani na 100 pokretanja Monte Carlo simulacije. Računarsko vrijeme potrebno za izvršavanje jednog pokretanja Monte Carlo simulacije na personalnom računaru (Intel Core i5-10th gen CPU, 16 GB RAM) iznosi 17 s.



Slika 8. IEEE mreža sa 33 čvora i naznačenom lokacijom priključenja potencijalnog PV sistema

Tabela 1. Meteorološki podaci za lokaciju u okolini Trebinja

Mjesec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Prosječni dnevni indeks vedrine	0,44	0,44	0,48	0,53	0,56	0,61	0,65	0,66	0,60	0,55	0,49	0,47
Prosječne minimalne mjesečne temperature [°C]	5,5	5,6	8,5	11,9	15,2	18,8	22,7	22,7	18,7	14,2	10,5	6,5
Prosječne maksimalne mjesečne temperature [°C]	11,2	11,3	14,4	17,9	22,3	26,2	30,3	30,3	25,4	20,4	16,6	12,4
Prosječan broj dana sa padavinama	12,2	12,9	11,6	10,2	9,5	6,7	2,4	2,5	6,4	10,3	15,3	13,5

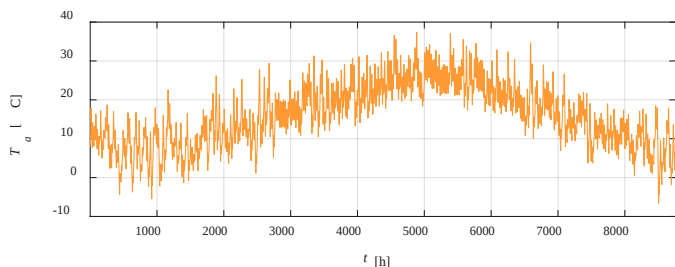
Tabela 2. Fiksni podaci korišćeni u simulaciji

Azimutalna orijentacija modula	0° (ka jugu)
Nagib modula	35°
Koeficijent refleksije podloge	0,2
Efikasnost invertora	96%
Odnos DC i AC snage invertora	1,1
Ukupni gubici PV sistema	14%

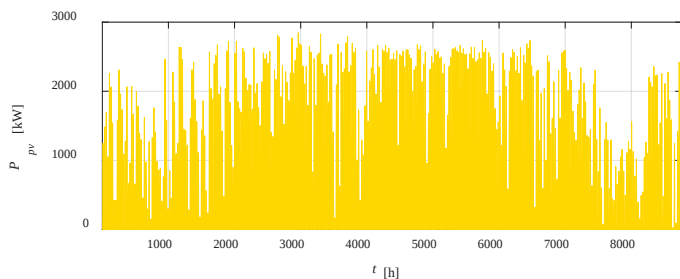
Nominalna radna temperatura PV ćelije	46,51°C
Granična vrijednost indeksa vedrine za oblačan dan	0,45

Na slici 9 prikazana je sekvenca promjene ambijentalne temperature za jednu proizvoljno izabranu godinu na lokaciji PV sistema. Sekvenca promjene proizvodnje PV sistema za jednu proizvoljno izabranu godinu prikazana je na slici 10. Iako je

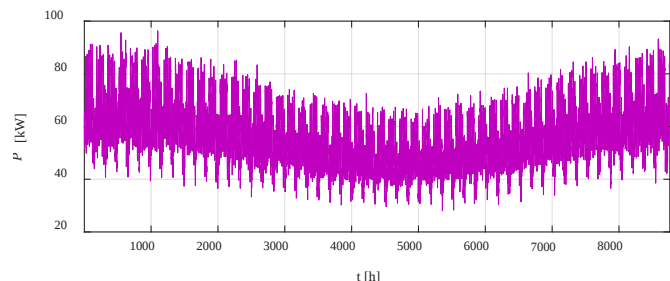
vršna snaga sistema 3,5 MW zbog postojanja gubitaka u sistemu, maksimalna snaga koja se predaje u mrežu je 2,85 MW. Takođe, sa dijagrama se jasno uočava stohastički karakter promjene snage PV sistema. Kao primjer dijagrama opterećenja potrošača, na slici 11, prikazana je sekvenca promjene opterećenja potrošača broj 18. Sa dijagrama se jasno uočava godišnja, sedmična, kao i dnevna promjena opterećenja. Raspodjela vjerovatnoća pojave napona u čvorovima mreže je data na slici 12. Prikazana je raspodjela vjerovatnoće za čvorove na početku mreže, sredini mreže i za čvorove na krajevima ogranaka. Čvor 3 je na samom početku mreže, te se napon u tom čvoru mijenja u jako uskim granicama oko nominalne vrijednosti (od 0,9822 do 1,003 r.j.), dok je čvor 6 je lociran dublje u mreži pa je i promjena napona veća (od 0,9474 do 1,018 r.j.). Napon u čvorovima 22 i 33, na krajevima ogranaka, je niži od nominalnog, a udaljenost potrošača od napojne tačke definiše promjenu napona. Čvor 22 je dosta bliži napojnoj tački od čvora 33 pa je i promjena napona manja. U čvor 18 je priključen PV sistem pa se napon značajnije mijenja u zavisnosti od snage injektiranja u mrežu (od 0,9092 do 1,225 r.j.). Da bi se mogla prikazati vjerovatnoća promjene napona u svim čvorovima, generisane su kumulativne funkcije raspodjele vjerovatnoće pojave napona. Kumulativne funkcije su grupisane u tri skupa i prikazane na slikama 13-15.



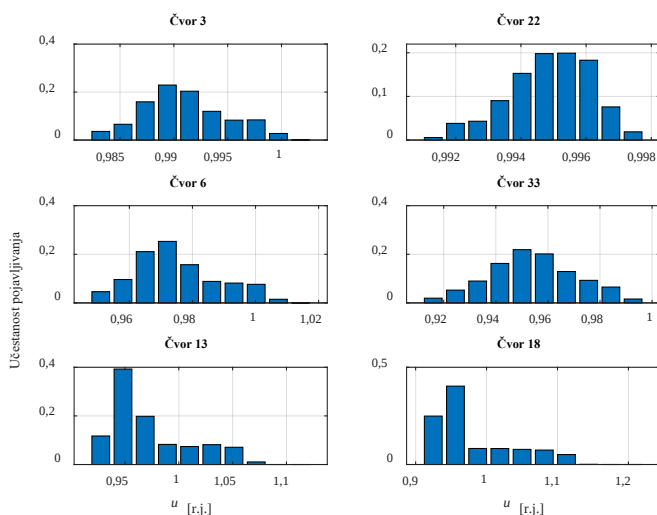
Slika 9. Satna sekvenca ambijentalne temperature generisana za jednu proizvoljnu godinu



Slika 10. Satna sekvenca proizvodnje PV sistema generisana za jednu proizvoljnu godinu



Slika 11. Satna sekvenca opterećenja potrošača broj 18 generisana za proizvoljnu godinu

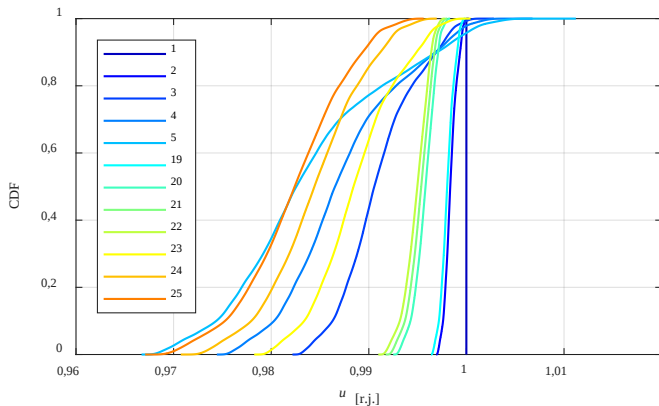


Slika 12. Raspodjela vjerovatnoća pojave napona u pojedinim čvorovima mreže

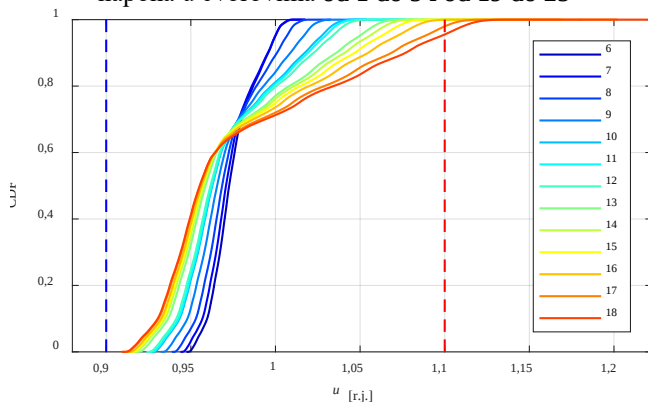
U prvom skupu, prikazanom na slici 13, prikazane su kumulativne funkcije raspodjele vjerovatnoće za čvorove koji su locirani na početku mreže pa su promjene napona manje. Čvor 1 je napojni čvor te je napon na njemu nominalan, bez obzira na radno stanje u mreži. Naponi u ostalim čvorovima zavise od radnog stanja, ali pošto su locirani blizu napojnog čvora, uticaj radnog stanja mreže nije toliko izražen. Na druge dvije slike je prikazana promjena napona na dva ogranka. Slika 14 prikazuje kumulativne funkcije raspodjele vjerovatnoća pojave napona u čvorovima od 6 do 18. Vertikalnim isprekidanim linijama su označene minimalne (plava) i maksimalne (crvena) vrijednosti napona prema normi EN 50160 za srednjenaponske mreže ($\pm 10\%$). Sa slike je uočljivo da PV sistem koji je priključen u čvoru 18 dovodi do toga da je napon u pojedinim trenucima veći od nominalnog u čvorovima 17 i 18. Vjerovatnoća da će napon u čvoru 18 biti niži od 1,1 r.j. je 0,95, dok za čvor 17 iznosi 0,98. Za ostale čvorove, vjerovatnoće da će naponi biti niži od 1,1 r.j. su približno jednake jedinici. Promjena nagiba krivih vidljiva na slici 14 je posljedica dijagrama proizvodnje PV sistema koji ne proizvodi energiju tokom čitavog dana. Na slici 15 su prikazane kumulativne funkcije raspodjele vjerovatnoće pojave napona u čvorovima od 26 do 33, tj. na ogranku mreže. Jasno se vidi da napon opada kako se čvor više udaljava od napojne tačke. Kriva kumulativne funkcije raspodjele vjerovatnoće napona u čvoru 33 nalazi se krajnje lijevo, jer odgovara krajnjem čvoru, a kriva 26 krajnje desno, jer odgovara prvom čvoru ogranaka. Kumulativne funkcije raspodjele vjerovatnoća napona u ostalim čvorovima se nalaze između njih.

Prema normi EN50160 definisano je da napon mora biti u opsegu $\pm 10\%$ oko nominalne vrijednosti 95% vremena u toku sedmice. Prethodno je prikazano da je vjerovatnoća 0,95 da će napon u čvoru 18 biti niži od 1,1 r.j. Kako je proizvodnja PV sistema neravnomjerna tokom godine i vjerovatnoća da će napon biti niži od 1,1 r.j. će se mijenjati od sedmice do sedmice. Na slici 16 prikazana je vjerovatnoća da će napon biti niži od 1,1 r.j. za svaku sedmicu u toku godine (puna linija) i granica prema normi EN50160 (isprekidana linija). Sa slike se može vidjeti da je vjerovatnoća da će napon biti niži od 1,1 r.j. približno jednaka jedinici tokom zimskih mjeseci, kada je proizvodnja nešto niža,

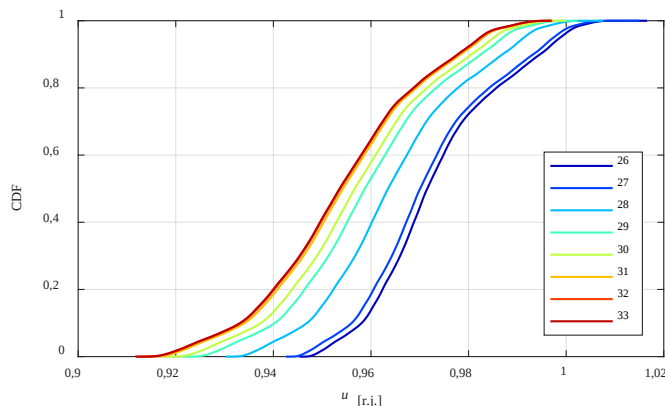
dok vjerovatnoća pada ispod graničnih 0,95 tokom većeg broja mjeseci u toku godine. Najniža vrijednost vjerovatnoće se javlja u 32. sedmici i iznosi 0,88. Na kraju, zaključujemo da će priključenje PV sistema dovesti do narušavanja naponskih ograničenja.



Slika 13. Kumulativne funkcije raspodjele vjerovatnoća napona u čvorovima od 1 do 5 i od 19 do 25



Slika 14. Kumulativne funkcije raspodjele vjerovatnoća napona u čvorovima od 6 do 18

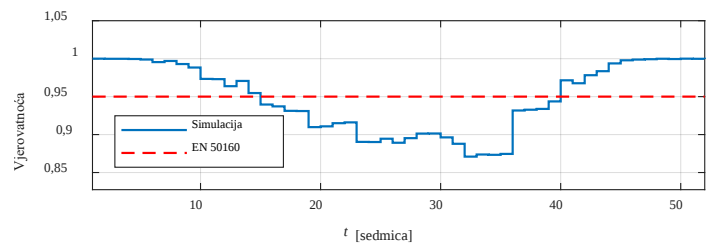


Slika 15. Kumulativne funkcije raspodjele vjerovatnoća napona u čvorovima od 26 do 33

Na slici 17 su prikazane sekvence opterećenja nekoliko vodova za proizvoljno izabranu godinu. Ako pretpostavimo da su maksimalne dozvoljene struje 400 A vodova između čvorova 1 i 9, a ostalih vodova 200 A [36], zaključuje se da neće doći do narušavanja prenosne moći vodova ako se na mrežu priključi PV sistem. Maksimalna struja voda 1 iznosi 218,35 A što je dosta

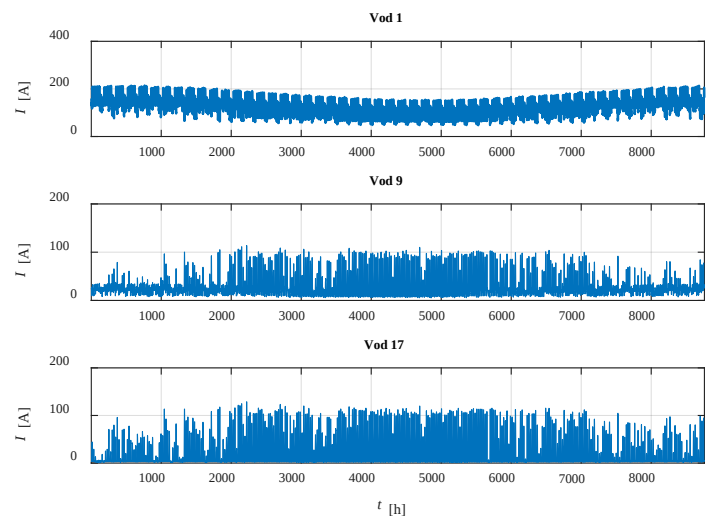
manje od 400 A, a maksimalna struja koja bi tekla vodom koji povezuje čvorove 17 i 18 je 136,3 što je manje od 200 A. Stohastička priroda proizvodnje PV sistema se može vidjeti i u promjeni efektivne vrijednosti struje po vodovima. Naravno, promjena je veća u okolini čvora na koji je povezan PV sistem (vod 17), dok je znatno manja na početku mreže (vod 1).

Na kraju kada se sumiraju svi rezultati proračuna, zaključuje se da bi priključenje PV sistema snage 3,5 MWp dovelo do narušavanja naponskih ograničenja mreže. Naime, prosječno 442,11 časova u toku godine napon u čvoru 18 bi bio veći od 1,1 r.j. Striktno gledano, PV sistem snage 3,5 MWp se ne može priključiti na distributivnu mrežu a da ne dođe do narušavanja pogonskih ograničenja mreže



Slika 16. Vjerovatnoća da će napon u čvoru 18 na nivou sedmice biti manji od 1,1 r.j.

Međutim, kako bi relativno mali broj časova bila narušena pogonska ograničenja mreže, može se dodatno analizirati koliko manje energije bi se isporučilo u mrežu ako bi se ograničila snaga proizvodnje PV sistema. Takođe, energija koja se ne može trenutno isporučiti u mrežu kada se proizvede, mogla bi se uskladištiti, te u nekom drugom trenutku isporučiti u mrežu. Ovo će svakako biti predmet narednih istraživanja. Sa druge strane, ako se isključi mogućnost ograničenja maksimalne snage PV sistema, onda bi trebalo smanjiti instalisanu snagu. Maksimalna snaga PV sistema koji bi se, prema normi EN 50160, mogao priključiti u čvor 18 (da napon u svim čvorovima mreže 95% vremena u toku sedmice bude u granicama $\pm 10\%$ oko nominalne vrijednosti) iznosi 3,24 MWp.



Slika 17. Satna sekvenca opterećenja pojedinih vodova generisana za proizvoljnu godinu

IV ZAKLJUČAK

U radu je razvijen simulator, na bazi sekvencijalne Monte Carlo simulacije, za analizu mogućnosti priključenja fotonaponskog sistema date snage na unaprijed definisanu lokaciju. U sklopu simulatora je prvo izvršeno probabilističko modelovanje vremenskih serija proizvodnje fotonaponskog sistema i potrošnje. Proračun tokova snaga je izvršen u specijalizovanom softveru za proračun distributivnih mreža, Open DSS-u. Za ilustraciju razvijenog simulatora izvršena je analiza mogućnosti priključenja fotonaponskog sistema snage 3,5 MWp na distributivnu mrežu. Analizom je utvrđeno da je vjerovatnoća 0,95 da će u toku godine napon na najkritičnijim sabirnicama biti manji od 1,1 r.j. Međutim kako je proizvodnja PV sistema promjenljiva tokom godine, ispostavlja se da je vjerovatnoća da će napon u toku sedmice biti niži od 1,1 r.j. niža od 0,95 koliko propisuje norma EN50160. Striktno gledano, priključenje posmatranog PV sistema će dovesti do narušavanja pogonskih ograničenja mreže, što dovodi do zaključka da se pomenuti sistem ne može priključiti na distributivnu mrežu. Kako je relativno mala vjerovatnoća da će biti narušena pogonska ograničenja, dodatne analize bi trebalo da budu usmjerene na načine upravljanja radom PV sistema tako da se narušavanja ograničenja izbjegnu.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Ismael, S.M., Abdel Aleem, S.H.E., Abdelaziz, A.Y., Zobaa A.F. State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation, *Renewable Energy*, Vol. 130, pp. 1002-1020, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.008>
- [2] Adefarati, T., Bansal, R.C., Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 10, No. 7, pp. 873-884, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0378>
- [3] Schavemaker, P., van der Sluis, L. *Electrical Power System Essentials*, John Wiley, 2008.
- [4] Ramadhani, U.H., Shepero, M., Munkhammar, J., Widén, J., Etherden, N. Review of probabilistic load flow approaches for power distribution systems with photovoltaic generation and electric vehicle charging, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 120, No. 106003, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106003>
- [5] Borkowska, B. Probabilistic Load Flow, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 752-759, 1974. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1974.293973>
- [6] Allan, R.N., Grigg, C. H., Al-Shakarchi, M. R. G. Numerical techniques in probabilistic load flow problems, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 853-860, 1976. <https://doi.org/10.1002/nme.1620100412>
- [7] Allan, R.N., Da Silva, A.M.L., Burchett, R.C. Evaluation methods and accuracy in probabilistic load flow solutions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 5, pp. 2539-2546, 1981. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.316721>
- [8] Hu, Z., Wang, X. A probabilistic load flow method considering branch outages, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No. 2, pp. 507-514, 2006. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.873118>
Rubinstein, R.Y., Kroese, D.P. *Simulation and the Monte Carlo Method*, John Wiley & Sons, 2017. <https://doi.org/10.1002/9781118631980>
- [9] Bollen, M., Hassan, F. *Integration of Distributed Generation in the Power System*, Wiley – IEEE Press, Hoboken, USA, 2011.
- [10] Conti, S., Raiti, S. Probabilistic load flow using Monte Carlo techniques for distribution networks with photovoltaic generators, *Solar Energy*, Vol. 81, No 12, pp. 1473-1481, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.02.007>
- [11] Baut, J.L., Zehetbauer, P., Bletterie, B., Kadam, S., Hatzigargyriou, N., Smith, J., Rylander, M. Probabilistic evaluation of the hosting capacity in distribution networks, in *Proc. Proceedings IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Ljubljana, Slovenia, pp. 1-6, 9-12 October 2016. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2016.7856213>
- [12] Püvi, V., Lehtonen, M. Evaluating distribution network optimal structure with respect to solar hosting capacity, *Electric Power Systems Research*, Vol. 216, 109019, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109019>
- [13] Zhao, Z., Xue, Y., Liu, Z., Zheng, W., Duan, S., Yu, L. A novel estimation method for maximum PV hosting capacity in radial distribution networks using bus voltage and electrical distance, *Electric Power Systems Research*, Vol. 224, 109791, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109791>
- [14] Rabiee, A., Mohseni-Bonab, S.M. Maximizing hosting capacity of renewable energy sources in distribution networks: A multi-objective and scenario-based approach, *Energy*, Vol. 120, pp. 417-430, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.095>
- [15] Schuol, J., Abbaspour, K.C. Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa, *Ecological Modelling*, Vol. 201, No. 3-4, pp. 301-311, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.09.028>
- [16] Pickering, N.B., Hansen, J.W., Jones, J.W., Wells, C.M., Chan, V.K., Godwin, D.C. WeatherMan: a utility for managing and generating daily weather data, *Agronomy Journal*, Vol. 86, No. 2, pp. 332-337, 1994. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600020023x>
- [17] Zeljković, Č., Mršić, P., Erceg, B. Simulation-based energy assessment of PV systems installed in an urban environment, in *Proc. 20th International Symposium Power Electronics Ee2019*, Novi Sad, Serbia, October 23-26, 2019. <http://dx.doi.org/10.1109/PEE.2019.8923517>
- [18] European Commission Joint Research Centre, PVGIS Solar radiation tool, <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> [preuzeto 03.02.2024]
- [19] Aguiar, R.J., Collares-Pereira, M., Conde, J.P. Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices, *Solar Energy*, Vol. 40, No. 3, pp.269-279, 1988. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90049-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90049-7)
- [20] Aguiar, R.J., Collares-Pereira, M. TAG: A time-dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation, *Solar Energy*, Vol. 49, No. 3, pp.167-174, 1992. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(92\)90068-L](https://doi.org/10.1016/0038-092X(92)90068-L)
- [21] Ridley, B., Boland, J., Lauret, P. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 478-483, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.018>
- [22] Masters, G.M. *Renewable and efficient electric power systems*, Wiley Interscience, New York, 2004.
- [23] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy*, Vol. 44, No. 5, pp. 271-289, 1990. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- [24] Dobos, A. P. PVWatts version 5 manual, Technical report, National Renewable Energy Laboratory, Denver, USA, 2014.
- [25] Soltani, A., Hoogenboom, G. A statistical comparison of the stochastic weather generators WGEN and SIMMETEO, *Climate Research*, Vol. 24, No. 3, pp. 215-230, 2003. <https://doi.org/10.3354/cr024215>
- [26] Reicosky, D.C., Winkelman, L.J., Baker, J.M., Baker, D.G. Accuracy of hourly air temperatures calculated from daily minima and maxima, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 46, No. 3, pp. 193-209, 1989. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90064-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90064-6)
- [27] Wang, P., Billinton, R. Time sequential distribution system reliability worth analysis considering time varying load and cost models, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, pp. 1046-1051, 1999. <https://doi.org/10.1109/61.772352>
- [28] Bae, I.S., Kim, J.O., Kim, J.C., Singh, C. Optimal operating strategy for distributed generation considering hourly reliability worth, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 1, pp. 287-292, 2004. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818738>
- [29] Starčević, V., Zeljković, Č., Kitić, N., Mršić, P., Erceg, B., Jovanović, V. PV System Integration Assessment by Automated Monte Carlo Simulation in DiGSILENT PowerFactory, in *Proc. 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 17-19 March 2021. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH51037.2021.9400525>
- [30] Mahdavi, M., Sabillón, C., Ajalli, M., Monsef, H., Romero, R. A real test system for power system planning, operation, and reliability, *Journal of control, automation and electrical systems*, Vol. 29, pp.192-208, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40313-017-0361-8>

- [31] Yaprakdal, F., Baysal, M., Anvari-Moghaddam, A. Optimal operational scheduling of reconfigurable microgrids in presence of renewable energy sources, *Energies*, Vol. 12, No. 10, pp. 1858, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12101858>
- [32] Dugan, R.C., Montenegro, D. *Reference guide, the open distribution system simulator*, Electric Power Research Institute, Inc., Washington, 2022.
- [33] Weather Atlas, <https://www.weather-atlas.com/> [pristupljeno 20.02.2024]
- [34] European Commission Joint Research Centre, PVGIS Solar radiation tool, <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> [pristupljeno 20.2.2024]
- [35] Cruz, M. R. M., Fitiwi, D. Z., Santos, S. F., Catalão, J. P. S. Influence of distributed storage systems and network switching/reinforcement on RES-based DG integration level, in *Proc. 13th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Porto, Portugal, pp. 1-5, 6-9 June 2016. <https://doi.org/10.1109/EEM.2016.7521337>

AUTORI/AUTHORS

Predrag Mršić – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet; Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, predrag.mrsic@etf.unibl.org, ORCID [0000-0002-8717-7292](https://orcid.org/0000-0002-8717-7292)

dr Čedomir Zeljković – vanredni profesor, Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, cedomir.zeljkovic@etf.unibl.org, ORCID [0000-0002-1467-0035](https://orcid.org/0000-0002-1467-0035)

dr Predrag Stefanov – redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, stefanov@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-4054-2202](https://orcid.org/0000-0003-4054-2202)

Assessing the Possibility of PV Integration to the Medium Voltage Distribution Network by Using Sequential Monte Carlo Simulation

Abstract – In this paper, a simulator for assessing the possibility of PV integration to the medium voltage distribution network is developed. The PV location and peak power are defined in advance. The simulator is based on sequential Monte Carlo simulation with various possible uncertainties such as photovoltaic production and load. In addition, the sequential simulation enables detection of period when the network constraints are violated. For this analysis, time series of essential variables such as PV system production and load are modeled. Based on the results of power flow calculation, probability distributions of the voltage at various nodes, the loads on individual lines as well as the probability of network constraints exceeding are determined. Depending on the network constraints, possibility of connecting the PV system to the network at the desired location is assessed. The power flow calculation is executed by using the OpenDSS simulator, while the input time series are prepared in Matlab. The method presented in this paper is tested on IEEE 33 distribution test network.

Index Terms – Distribution network, PV system, Hosting capacity, Sequential Monte Carlo simulation

Može li veštačka inteligencija da doprinese pravednoj energetske tranziciji?

Dr Miroslav Parović

Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet Novi Sad

Rezime - Nivo pravednosti energetske tranzicije dominantno zavisi od izbalansiranosti energetske trileme u posmatranoj državi. Veštačka inteligencija (AI) i mašinsko učenje imaju potencijal da unaprede ukupne performanse energetske sistema. Prednost ovih tehnologija je što se mogu primeniti u sektorima proizvodnje i potrošnje energije čime se može maksimizovati energetska efikasnost i time smanjiti nivo potrošnje primarne energije. Isto tako, AI se može koristiti za povećanje nivoa fleksibilnosti elektroenergetskog sistema čime se omogućava veće uključivanje obnovljivih izvora. Sve ovo utiče na smanjenje emisija što predstavlja jednu od najvažnijih normi u dostizanju ciljeva dekarbonizacije ekonomije. Pored navedenog, AI može da se koristi kako bi se poboljšala pouzdanost rada energetske sistema i smanjili ukupni troškovi njihove eksploatacije.

Naravno, postoje i značajna ograničenja u primeni veštačke inteligencije. Pre svega, trenutno se ima dosta veliki problem sa adekvatnom radnom snagom potreban za dalji razvoj što pravi određeni „čep“ u primeni u energetske sektoru. Takođe, potrošnja električne energije AI nije zanemarljiva što potencijalno predstavlja dodatno opterećenje za proizvodne kapacitete.

Cilj istraživanja je da se napravi pregled dosadašnjih primena AI u sektoru energetike i da se na konkretnim primerima da kritički osvrt o uticaju na energetske pravdu. U samom radu biće korišćena i komunikacija sa javno dostupnim alatom baziranim na veštačkoj inteligenciji, ChatGPT, kako bi se došlo do određenog seta informacija o temi koja se istražuje. Na ovaj način će AI biti direktno uključena u istraživanje na način da će u ChatGPT biti postavljen set konkretnih pitanja vezanih za temu koja se obrađuje, a dobijeni odgovori biće sastavni deo rada.

Ključne reči - Energetska pravda, Veštačka inteligencija (AI), Energetska tranzicija

I UVOD

U najširem kontekstu posmatrano pod veštačkom inteligencijom (AI, engl. *Artificial intelligence*) se podrazumeva bilo koji računarski sistem koji na neki način oponaša prirodnu inteligenciju, a sa ciljem izvršavanja određenih zadataka. AI se ne može posmatrati kao jedinstvena tehnologija ili proizvod, već je tu reč o širokom skupu tehnika, matematičkih modela i algoritama sa sposobnošću rada sa velikim brojem podataka, identifikacijom obrazaca u ponašanju i mogućnošću predviđanja verovatnoće određenih ishoda složenih situacija. Osnovna podela veštačke inteligencije je na dva tipa:

- sistemi zasnovani na pravilima,

- sistemi koji uče (ova grupa obuhvata oblast mašinskog učenja).

Sisteme bazirane na veštačkoj inteligenciji ne treba mešati sa automatizovanim sistemima, jer iako postoji povezanost, ipak suštinska razlika je u tome što automatizovani sistemi rade zadatke koji se ponavljaju prateći programski kod i skup pravila koja su na taj način definisana. Sa druge strane AI na bazi stalne obrade velikog skupa podataka identifikuje određene obrasce i na taj način modifikuje radne procese, odnosno praktično kroz pređašnje iskustvo uči kako da radi tačnije i efikasnije. Može se reći da je koncept AI sveobuhvatan i da predstavlja logičan nastavak razvoja i nadogradnja oblasti informacionih tehnologija (IT) i automatizacije. Imajući u vidu da je IT već zauzeo značajno mesto u savremenom konceptu energetske tranzicije koji prati matricu 4D (dekarbonizacija, decentralizacija, digitalizacija i demokratizacija) [1], logično je da i AI bude sve više korišćena u cilju dostizanja postavljenih ciljeva.

Ono što je trenutno problem upotrebe veštačke inteligencije u bilo kojoj oblasti, pa i u energetske sektoru, jeste to što još uvek traju diskusije o uticaju koji ova tehnologija nosi na društvo u celini. Sa jedne strane postoji predstava kako je AI svojevrsni čarobni štapić koji će rešiti sve probleme u brojnim oblastima i time doneti velike koristi, dok druga krajnost ide u pravcu osuđivanja ove tehnologije kao previše rizične jer eliminiše direktan uticaj ljudi na niz važnih procesa donošenja odluka i potencijalno može da dovede do smanjenja potrebe za radnom snagom. Dosadašnja praksa pokazuje da uvođenje novih tehnologija u energetske sektor ne dovodi nužno do pravednih ishoda u procesu tranzicije. U radu [2] prikazano je kako svaki od glavnih benefita koji se dobijaju primenom novih tehničkih rešenja i savremenih energetske tehnologija dolazi sa pratećim skupom rizika. Glavni izazov se ima u tome da nastojanje ka povećavanju pristupačnosti i održivosti, naruše principe jednakosti i poštovanja.

U okviru rada biće dat pregled dosadašnje prakse primene veštačke inteligencije u okviru energetske sektora, uz osvrt na potencijal za dalji prodor ove tehnologije. Posebna pažnja biće posvećena kvalitativnoj analizi mogućeg uticaja AI na pravednost u postupku energetske tranzicije. Takođe, korišćenjem dostupnih alata kao što je ChatGPT biće izvršeno direktno uključivanje veštačke inteligencije u istraživanje uz komentar na dobijene odgovore.

II OBLAST PRIMENE VEŠTAČKE INTELEGENCIJE U SEKTORU ENERGETIKE

U procesu tranzicije ka dekarbonizovanoj ekonomiji, a što je koncept koji sve više preovladava pogotovo u Evropskoj Uniji, energetika igra centralnu ulogu. Iz tog razloga se ima sve veći stepen interakcije između sektora električne energije, transporta, industrije i građevinarstva, a što se postiže dodatnim sprežanjem električne i telekomunikacione mreže. Ovakva postavka energetskog sistema ide u pravcu dubinske elektrifikacije koja podrazumeva da krajnji korisnici imaju isključivo dodir sa električnom energijom koja bi u najvećoj meri zamenila sve ostale vidove energije [3]. Da bi takav sistem mogao da funkcioniše u praksi neophodna je optimizacija svakog dela elektroenergetskog sistema, kao i veća koordinacija i saradnja među njima.

Zbog svega ovoga je neophodna digitalizacija čitavog sistema kako bi se izvršilo povezivanje različitih sektora na pouzdan, pristupačan i na način da se ima najmanji štetan uticaj na životnu sredinu (najčistiji). Daljim poboljšanjem performansi kao i sve većom dostupnošću podataka digitalne tehnologije će zauzimati sve značajniju ulogu u procesu brze i povoljne energetske tranzicije. Ovo će se postizati kombinacijom automatizacije, optimizacije i kroz omogućavanje novih poslovnih i operativnih modela unutar i izvan tradicionalnog lanca vrednosti: proizvodnja, prenos, distribucija, trgovina i potrošnja [4].

Postavka elektroenergetskog sistema takva da se ide u pravcu dubinske elektrifikacije uz dekarbonizaciju, podrazumeva značajno veću decentralizaciju. Tako da prema dugoročnom ekonomskom scenariju [5] projekcije za 2050. godinu idu u pravcu da će se 56% ukupne svetske proizvodnje električne energije imati uz pomoć solarnih elektrana i vetroturbina (7,6 TW solar, 4,6 TW vetar). I generalno, taj najoptimalniji scenario globalne energetske tranzicije podrazumeva značajne transformacije čitavog sistema, a osnovne karakteristike su date u okviru tabele:

Tabela 1. Projekcije glavnih karakteristika elektroenergetskog sistema za 2050. godinu [5]

nizak nivo sektorskog povezivanja.
Projekcije stanje globalnog elektroenergetskog sistema za 2050.
Konfiguracija prenosne mreže: - proizvodnja dominantno bazirana na OIE uz deo bazne energije iz tranzicionih goriva (zemni gas i nuklearna energija), - veliki industrijski sistemi direktno priključeni na prenos, - značajno proširena prenosna mreža kako bi mogla da prihvati povećanu proizvodnju iz OIE, - javni saobraćaj (železnica).
Konfiguracija distributivne mreže: - zgrade koje su spregnute sa ostakom sistema i nisu više samo pasivni potrošači već i proizvođači energije, - industrija i poslovni sistemi, - distribuirani izvori energije čiji je udeo značajno uvećan, - proizvodnja „zelenog“ vodonika direktnim sprežanjem sa distribuiranim izvorima energije, dalja upotreba vodonika za proizvodnju električne energije, - mala i srednja preduzeća koja kao i zgrade ulaze u status aktivnih proizvođača električne energije, - baterijski sistemi za skladištenje električne energije, - električna vozila koja postaju i sastavni deo elektroenergetskog sistema imajući u vidu da će skladištiti deo električne energije koja će se proizvoditi u distribuiranim izvorima.
Učešće savremenih energetskih tehnologija i principa koji značajno utiču na dekarbonizaciju: - obnovljivi izvori energije 12TW, - baterijski sistemi za skladištenje energije 1,3TW, - veliki udeo toplotnih pumpi u sektoru grejanja (težnja ka potpunoj elektrifikaciji sistema grejanja), - globalni udeo fleksibilnog opterećenja oko 8%, - broj električnih vozila oko 836 miliona, - visok nivo sektorskog povezivanja prevashodno na distributivnom nivou koji postaje vrlo dinamičan sistem u kojem se električna energija troši, proizvodi i skladišti, te preko koga se omogućava aktivna kontrola opterećenja.

Da bi se elektroenergetski sistem transformisao na ovaj način neophodna su značajna ulaganja, koja u zavisnosti od scenarija tranzicije koji se analizira iznose preko 90 biliona dolara u narednih trideset godina (prema „net-zero“ scenariju [5] potrebne investicije se procenjuju do 173 biliona dolara).

Kako je to u uvodnom delu rečeno, AI je moćan alat koji može da odgovori izazovima upravljanja složenim procesima energetske tranzicije kroz postizanje veće ukupne efikasnosti sistema, što smanjuje ukupne troškove i povećava brzinu tranzicije i to pogotovo u sektoru proizvodnje električne energije. Prema rezultatima analize koja je rađena od strane Nemačke agencije za energetiku [6], detektovane su sledeće oblasti energetskog sistema u kojima se veštačka inteligencija može koristiti:

- predviđanje potrošnje i nivoa proizvodnje električne energije iz OIE (Predviđanje),
- funkcionisanje i optimizacija elektro mreže (Mreža),
- upravljanje potražnjom za energijom (Menadžment

Stanje globalnog elektroenergetskog sistema u 2020.
Konfiguracija prenosne mreže: - proizvodnja bazirana na velikim elektranama (termoblokovi (ugalj, gas), nuklearne elektrane i hidroelektrane), - veliki industrijski sistemi direktno priključeni na prenos, - prenosna mreža, - javni saobraćaj (železnica).
Konfiguracija distributivne mreže: - zgrade, - industrija i poslovni sistemi, - distribuirani izvori energije, - mala i srednja preduzeća.
Učešće savremenih energetskih tehnologija i principa koji značajno utiču na dekarbonizaciju: - obnovljivi izvori energije 1,5TW, - baterijski sistemi za skladištenje energije 11GW, - mali udeo toplotnih pumpi u sektoru grejanja, - globalni udeo fleksibilnog opterećenja ispod 1%, - broj električnih vozila oko 12 miliona,

potrošnje),

- kreiranje novih materijala i inovacija (Menadžment inovacija).

Za svaku od navedenih oblasti primene važno je imati odgovarajuće skupove ulaznih podataka nad kojima AI operiše i na taj način izvršava zadatke uz „učenje“ i povezano sa time stalno unapređivanje radnih procesa. Prema načinu sakupljanja i klasifikacije može se napraviti kategorizacija podataka [6] vezano za neku od oblasti primene veštačke inteligencije:

- **Podaci o vremenu i tržištu (energije, usluga i roba)** – ovaj set podataka se dominantno koristi za predviđanje proizvodnje električne energije iz OIE kao i za predviđanja potrošnje. Takođe, analiza ovih podataka je potrebna za adekvatno održavanje rada i optimizaciju elektro mreže (vremenski podaci) kao i za upravljanje potrošnjom (vremenski podaci i tržišne prilike).
- **Slike i video zapisi** – koriste se u delu predviđanja proizvodnje iz OIE, kao i u obezbeđivanju adekvatnog rada elektromreže.
- **Podaci sa opreme i senzora** – ovaj set podataka dominantno se koristi u oblastima rada i optimizacije mreže, kao i u menadžmentu potrošnje.

III ANALIZA PRIMENE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U SEKTORU ENERGETIKE I UTICAJ NA PRAVEDNOST ENERGETSKE TRANZICIJE

U prethodnom poglavlju su na osnovu rezultata ranijih istraživanja [4] definisane četiri oblasti za koje očekuje da su najpogodnije za primenu veštačke inteligencije u sektoru energetike. U okviru ovog poglavlja biće detaljnije opisana svaka od navedenih oblasti sa navođenjem pojedinih primera iz prakse i osvrtno na potencijalni uticaj na nivo pravednosti u procesu energetske tranzicije. Pri tome će se pravednost u procesu energetske tranzicije gledati kroz prizmu definicije da je stepen energetske pravde u direktnoj srazmeri sa izbalansiranošću energetske trileme [7].

1. Predviđanje potrošnje i nivoa proizvodnje električne energije iz OIE (Predviđanje)

Proizvodni sistemi bazirani na obnovljivim izvorima energije imaju proizvodnju izrazito zavisnu od vremenskih prilika, a što se pogotovo odnosi na solarne elektrane i vetroturbine. Iz tog razloga predviđanje proizvodnje igra veoma značajnu ulogu u čitavom procesu i može značajno da utiče na prihode koje elektrana ostvaruje. Veštačka inteligencija u ovom segmentu već ima sve značajniju ulogu jer svojstvo da na bazi istorijskih podataka o nekim pojavama može da izvlači zaključke i prilagođava akcije je u ovom segmentu vrlo primenljivo. Savremeni sistemi prate parametre vremenskih prilika i upoređuju ih sa ranije prikupljenim podacima što je osnova za odlučivanje o akcijama, recimo o postavljanju položaja lopatica na vetrogeneratorima, i shodno tome se mogu vršiti i predviđanja o proizvodnji.

Važan segment u funkcionisanju elektrana jeste njihovo redovno održavanje. Okvirna cena iznosi oko 1% ukupne proizvodnje električne energije za solarne elektrane i skoro 20% od proizvodnje vetroelektrana u priobalju mora [4]. Za slučaj ispada iz proizvodnje troškovi postaju značajni jer se ima dugo vreme u

beznaponskom stanju. Zbog svega ovoga se uvode sistemi bazirani na AI tehnologiji koji uz pomoć senzorskih očitavanja mogu da optimizuju tekuća održavanja i smanje potrebna ulaganja, ujedno olakšavaju detekciju i dijagnostiku potencijalnih kvarova i tako ubrzavaju period opravke čime se smanjuje vreme ispada.

Potrošnja predstavlja još složeniji sistem u odnosu na proizvodnju imajući u vidu da zavisi od većeg broja faktora. Sistemi bazirani na veštačkoj inteligenciji su dobri u uočavanju složenih obrazaca ponašanja i mogu na bazi istorijskih podataka o potrošnji da vrše dosta dobru projekciju budućeg kretanja. Shodno tome postoji realan okvir i veliki potencijal za bolje poklapanje prognoza proizvodnje sa prognozama potrošnje električne energije i to u svim vremenskim okvirima koji odgovaraju standardnim intervalima trgovanja (nedeljno, dan unapred, sat unapred i unutar sata).

Kao jedan konkretan primer primene u praksi može se navesti kompanija Google i njena podružnica AI DeepMind koje su tokom 2019. godine razvili neuronsku mrežu kako bi povećali tačnost prognoza za svoj portfolio obnovljivih izvora energije snage 700 MW (vetroelektrane). Na osnovu istorijskih podataka, mreža je razvila model za predviđanje buduće proizvodnje do 36 sati unapred sa mnogo većom preciznošću nego što je to ranije bilo moguće. Na ovaj način je omogućeno da se energija prodaje unapred umesto u realnom vremenu, a što zajedno sa još nekim sistemima baziranim na AI povećava finansijsku vrednost proizvedene energije za 20% [8]. Pored korišćenja AI za predviđanje proizvodnje u sistemima baziranim na OIE, korisna je njihova upotreba i u postojećim sistemima baziranim na fosilnim gorivima, recimo u termoelektranama na uglj [9]. Na ovaj način se optimizuje rad termoelektrane što utiče na povećanje ukupne efikasnosti i smanjenje štetnih emisija.

2. Funkcionisanje i optimizacija elektro mreže (Mreža)

Izgradnja sve većeg broja velikih proizvodnih postrojenja baziranih na OIE, kao i nagli porast primene distribuiranih izvora energije dovodi do stvaranja zagušenja kako na prenosnom tako i na distributivnom naponskom nivou. Elektromreža postaje sve veće usko grlo za dalji tok energetske tranzicije imajući uvidu dug period potreban za izgradnju potrebnih novih kapaciteta (veći dalekovodi iziskuju i do deset godina za realizaciju) [4]. Iz tog razloga će korišćenje veštačke inteligencije za optimizaciju rada mreže i poboljšanje kapaciteta postojećih prenosnih i distributivnih vodova, kao i produženje životnog veka postojeće opreme, dati značajnu podršku brzom energetske tranziciji. Procene govore da bi do 2050. godine trebalo uložiti oko 14 biliona dolara u nove mrežne kapacitete [5]. To znači dodatnih stotine hiljada kilometara dalekovoda, vodova, trafostanica i druge mrežne opreme. Na ovaj način čitav elektro energetski sistem postaće još složeniji i samim tim teži za upravljanje. Značajno će porasti i troškovi redovnog održavanja mrežne opreme, dok će problemi stalnog rasta temperature kao i ekstremnih vremenskih prilika u vidu lokalnih temperaturnih šokova značajno doprineti skraćenju životnog veka ugrađene opreme koja je osetljiva na temperaturna preopterećenja (problem tzv. starenja izolacije).

Veštačka inteligencija može značajno da pomogne u tekućem održavanju mreže tako što će se analiza rada vršiti uz pomoć

robotskih sistema i dronova čime će se olakšati detekcija kvarova [10]. Korišćenjem istorijskih podataka o vremenskim prilikama kao i podacima u realnom vremenu može se vršiti takvo upravljanje tokovima snaga koje će rasterećivati deonice kod kojih bi postojala opasnost od temperaturnog preopterećenja. AI može da se koristi i u planiranju daljeg razvoja mreže tako što se dalja proširenja vrše na bazi istorijskih podataka o tokovima snaga. Na sličan način se može uz pomoć AI vršiti i optimalno upravljanje tokovima snaga.

Postoji dosta primera praktične primene AI u ovoj oblasti. Recimo kompanija E.ON razvila je algoritam mašinskog učenja za predviđanje kada je potrebno zameniti kablove srednjeg napona u mreži, koristeći podatke iz niza izvora da identifikuje obrasce u proizvodnji električne energije. Njihova praksa sugerise da bi prediktivno održavanje moglo da smanji prekidu u mreži do 30% u poređenju sa konvencionalnim pristupom [8].

3. Upravljanje potražnjom za energijom (Menadžment potrošnje)

Ova oblast primene veštačke inteligencije je dominantno vezana za distributivni naponski nivo. Kao što je to prikazano u Tabeli 1 u procesu energetske tranzicije najveće promene će se imati upravo na nivou distribucije. Pojavljuje se sve više distribuiranih izvora energije, baterijskih sistema za skladištenje, električnih automobila. Takođe, zgrade prestaju da budu samo pasivni potrošači već prelaze u status aktivnog učesnika u elektroenergetskom sistemu (jedan koncept je povezivanje urbanih područja u tzv. Pozitivne energetske distrikte [11]). U ovoj oblasti upotreba AI sistema mahom je vezana za uvezivanje različitih komponenti i optimizaciju njihovog rada. Recimo, uz pomoć veštačke inteligencije biće moguće pomeranje potrošnje i njeno usklađivanje sa proizvodnjom baziranom na OIE.

Konkretna primena AI u ovoj oblasti ima se u sistemima za kontrolu i optimizaciju punjenja električnih automobila. Uz pomoć veštačke inteligencije se minimizuju troškovi za punjenje imajući u vidu da ova tehnologija reaguje na vremenski promenljive i/ili lokacijske granične cene na tržištu električne energije.

4. Kreiranje novih materijala i inovacija (Menadžment inovacija)

Poboljšanje performansi postojećih materijala kao i kreiranje novih predstavlja jednu od važnijih pretpostavki za dalji tok energetske tranzicije. Dobar primer za to je stalni rad na poboljšanju karakteristika baterija za električna vozila kao i za velike baterijske sisteme u kojima će se skladištiti značajne količine električne energije. Međutim, proces otkrivanja, razvijanja i korišćenje naprednih materijala, koji treba da zadovolje složene specifikacije performansi, veoma je skup i dugotrajan. U tom kontekstu AI se vidi kao potencijalno koristan alat za ubrzanje procesa i optimizaciju troškova razvoja.

Posmatrano kroz sočivo energetske pravde, veštačka inteligencija svoj ključni doprinos pravednim ishodima daje kroz unapređenje ukupne efikasnosti elektroenergetskog sistema. Na taj način se ostvaruju značajna umanjivanja u emisijama štetnih gasova, smanjenja troškova tekućeg održavanja opreme u elektroenergetskom sistemu i omogućavanje većeg uključivanja OIE. Na ovaj način dobija se značajna količina čiste i pristupačne

energije. Sa druge strane, postoji dosta oblasti u kojima AI može da otvori dodatne nepravde ili da produbi neke postojeće. Jedna od bitnih tema je očuvanje privatnosti imajući u vidu to da uključivanje ove tehnologije zahteva veliki broj podataka o životnim navikama ljudi, kao i mogućnost da aktivno upravlja skoro svim uređajima u domaćinstvima. Takođe, značajniji prodor veštačke inteligencije podrazumeva neminovnu promenu u strukturi potrebne radne snage. U tom smislu u nekim sektorima će doći do smanjenja broja zaposlenih, dok će sve više zaposlenih trebati na samom razviu AI aplikacija. Kako bi se izbegle nepravde neophodno je izvršiti prekvalifikaciju dela zaposlenih, a ujedno to je i način da se izbegne usko grlo koje je trenutno prisutno imajući u vidu da zahtevi za stručnjacima u oblasti veštačke inteligencije daleko prevazilaze postojeće kapacitete. Ono što takođe predstavlja veliki izazov je to što AI ima potencijal da dodatno produbi jaz između najbogatijih i najsiriomašnjih imajući u vidu da zemlje u razvoju nemaju mogućnosti da značajnije ulažu čime još dodatno gube trku sa onim najrazvijenijima.

IV ISTRAŽIVANJE O TEMI RADA UZ POMOĆ DOSTUPNIH ALATA BAZIRANIH NA VEŠTAČKOJ INTELIGENCIJI

U okviru ovog poglavlja biće testirana mogućnost generisanja odgovora uz pomoć alata ChatGPT, a na dva ključna pitanja kojima se ovo istraživanje bavi. Korišćena je GPT-3.5 - free plan verzija kojoj je pristupljeno 15.03.2024. godine. Pri tome je izabran *zero-shot prompting* kao metod komunikacije sa Chat bot-om. Na ovaj način će veštačka inteligencija biti uključena da bude koautor u radu.

Metodologija koja će biti primenjena kako bi se istraživanje uradilo na adekvatan način je sledeća:

1. U ChatGPT biće postavljena sledeća dva pitanja: „Kako možemo koristiti veštačku inteligenciju u procesu pravedne energetske tranzicije?” i „Koja je uloga veštačke inteligencije u procesu pravedne energetske tranzicije?”
2. Odgovori će biti integralno preneti u rad.

1. *Kako možemo koristiti veštačku inteligenciju u procesu pravedne energetske tranzicije?*

Odgovor ChatGPT:

Veštačka inteligencija može igrati ključnu ulogu u olakšavanju pravedne energetske tranzicije na nekoliko načina:

- **Energetska efikasnost:** Veštačka inteligencija može optimizovati potrošnju energije u zgradama, industrijama i saobraćaju, smanjujući gubitke i emisije. Ovo pomaže u postizanju ciljeva održivosti uz osiguranje pristupa energetske efikasnim tehnologijama za sve zajednice.
- **Integracija obnovljivih izvora energije:** Algoritmi veštačke inteligencije mogu prognozirati proizvodnju energije iz obnovljivih izvora, upravljati stabilnošću mreže i optimizovati integraciju obnovljivih izvora poput solarnih i vetrogeneratora u energetske miks. Ovo osigurava glatku tranziciju ka čistijim izvorima energije uz minimalne poremećaje za zajednice koje se oslanjaju na tradicionalne izvore energije.
- **Pravičan pristup:** Alati sa veštačkom inteligencijom mogu

analizirati podatke kako bi identifikovali tačke energetskog siromaštva i razvili ciljne rešenja za poboljšanje pristupa pristupačnoj i čistoj energiji za marginalizovane zajednice. Ovo osigurava da niko ne bude zapostavljen u tranziciji ka održivim energetskim sistemima.

- Kreiranje radnih mesta i obuka: Veštačka inteligencija može pomoći u identifikaciji nedostataka veština i potreba za obukom radnika u energetskom sektoru. Pružajući personalizovane programe obuke i pomoć u zapošljavanju, veštačka inteligencija doprinosi stvaranju novih prilika za radnike u nastajućim zelenim industrijama.
- Podrška politikama: Veštačka inteligencija može analizirati velike količine podataka kako bi obavestila donosioc političkih o društvenim, ekonomskim i ekološkim uticajima različitih strategija energetske tranzicije. Ovo pomaže u dizajniranju politika koje prioritizuju pravednost, jednakost i održivost.
- Angažovanje zajednice: Platforme sa veštačkom inteligencijom mogu olakšati značajno angažovanje i saradnju između donosilaca politika, energetskih kompanija i lokalnih zajednica. Uključivanjem povratnih informacija zajednice u procese donošenja odluka, veštačka inteligencija pomaže u osiguravanju da inicijative energetske tranzicije odgovaraju potrebama i zainteresovanih strana.

Ukupno gledano, iskorišćavanje veštačke inteligencije u pravednoj energetskoj tranziciji ključno je za stvaranje održive, pravične i otporne energetske budućnosti za sve.

2. Koja je uloga veštačke inteligencije u procesu pravedne energetske tranzicije?

Odgovor ChatGPT:

Veštačka inteligencija (AI) igra ključnu ulogu u procesu pravedne energetske tranzicije na nekoliko načina:

- Analiza podataka: AI može analizirati ogromne količine podataka o potrošnji energije, emisijama, socio-ekonomskim faktorima i drugim relevantnim parametrima. Ova analiza omogućava bolje razumevanje potreba i izazova različitih zajednica tokom tranzicije.
- Optimizacija energetskih sistema: Korišćenjem algoritama mašinskog učenja, AI može optimizovati rad energetskih sistema, uključujući distribuciju i skladištenje energije. Ovo pomaže u povećanju efikasnosti i smanjenju troškova, što je ključno za osiguranje pristupačne energije za sve.
- Predviđanje potrošnje i proizvodnje energije: AI može predviđati potražnju za energijom i proizvodnju iz obnovljivih izvora kao što su solarna i vetroenergija. Ovo omogućava bolje upravljanje mrežom i smanjenje rizika od prekida u snabdevanju energijom.
- Identifikacija energetskog siromaštva: Kroz analizu podataka, AI može identifikovati zajednice koje su posebno pogođene energetskim siromaštvom i osmisliti strategije za poboljšanje pristupa energetskim resursima u tim područjima.

- Pomoć u donošenju odluka: AI može pružiti informacije i analize koje pomažu donosiocima politika da donose informisane odluke o energetskim politikama i investicijama. Ovo osigurava da tranzicija bude pravedna i da se uzmu u obzir potrebe svih zajednica.
- Unapređenje infrastrukture: AI može identifikovati potrebe za modernizacijom i unapređenjem energetske infrastrukture, uključujući mreže za distribuciju i skladištenje energije. Ovo pomaže u stvaranju otpornijih i efikasnijih energetskih sistema.

Ukupno gledano, AI igra ključnu ulogu u procesu pravedne energetske tranzicije tako što omogućava efikasnije korišćenje resursa, identifikuje potrebe zajednica i podržava donošenje informisanih odluka koje osiguravaju pristupačnu i održivu energiju za sve.

IV ZAKLJUČAK

Veštačka inteligencija ima potencijal da zauzme centralnu ulogu u ubrzanju globalne energetske tranzicije. Pri tome AI ima značajan potencijal da čitav taj proces učini pravednim. Međutim, veštačka inteligencija nije čarobni štapić kojim se svaki problem sa lakoćom može rešiti. Pre svega, trenutno postoji značajan problem sa nedostatkom adekvatne radne snage koja je neophodna za dalji razvoj AI i za njen značajniji prodor u sektor energetike. Takođe, izražen je i problem sa prevelikim očekivanjima koja se postavljaju dok istovremeno još uvek u dobrom delu čak i razvijenih društava postoji mentalna barijera prema veštačkoj inteligenciji koja se smatra potencijalno opasnom tehnologijom.

U okviru rada prikazana je aktuelna situacija u pogledu oblasti primene veštačke inteligencije u sektoru energetike. Analiza dostupne literature pokazuje jasan trend rasta primene kao i broja naučnih i stručnih radova koji potvrđuju pozitivne rezultate i otvaraju nove perspektive za primenu AI u procesu energetske tranzicije. U poslednjem poglavlju su odgovori na temu koja se istražuje generisani uz pomoć alata ChatGPT te je na taj način veštačka inteligencija uključena kao koautor rada. Ideja je da se na jednom mestu prikažu sličnosti i razlike u zaključcima, kao i da se da jedna sveobuhvatna slika o temi koja se obrađuje.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Parović, M. Uticaj novih energetskih tehnologija na nivo energetske pravde, *Energija, ekologija, ekonomija*, Vol. 25, No. 2, pp. 10-15, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.10P>
- [2] Sovacool, B., Lipson, M., Chard, R. Temporality, vulnerability, and energy justice in household low carbon innovations, *Energy Policy*, Vol. 128, pp. 495-504, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.010>
- [3] Morte, I. B. B., Araújo, O.F., Morgado, C.R.V., de Medeiros, J.L. Electrification and decarbonization: a critical review of interconnected sectors, policies, and sustainable development goals, *Energy Storage and Saving*, Vol. 2, No. 4, pp. 615-630, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2023.08.004>
- [4] World Economic Forum. *Hamessing Artificial Intelligence to Accelerate the Energy Transition*, 2021. <https://www.weforum.org/publications/harnessing-artificial-intelligence-to-accelerate-the-energy-transition/> [pristupljeno 11.03.2024]
- [5] BloombergNEF. *New Energy Outlook 2020*, 2021, https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/928908_NEO2020-Executive-Summary.pdf [pristupljeno 11.03.2024]

- [6] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Artificial Intelligence – from Hype to Reality for the Energy Industry, 2020. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena_ANA_LYSIS_Artificial_Intelligence_-_from_Hype_to_Reality_for_the_Energy_Industry.pdf [pristupljeno 11.03.2024]
- [7] Parović, M., Kljajić, M. Improvement of metric for quantification and assessment of the energy justice, Thermal Science, Vol. 26, No. 3, pp. 262-262, 2022. <https://doi.org/10.2298/TSCI210527262P>
- [8] Rozite, V., Miller, J., Oh, S. Why AI and energy are the new power couple, International Energy Agency. <https://www.iea.org/commentaries/why-ai-and-energy-are-the-new-power-couple> [pristupljeno 15.03.2024]
- [9] Knežević, S., Živković M. Predviđanje proizvodnje termoelektrane pomoću neuralnih mreža, Energija, ekologija, ekonomija, Vol. 25, No. 4, pp. 38-41, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-4.38K>
- [10] Zakić, M., Kvaščev, G. Procena mesta nastanka kvara na električnomvodu primenom veštačkih neuralnih mreža, Energija, ekologija, ekonomija, Vol. 24, No. 4, pp. 68-74, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.68Z>
- [11] Parović, M. Razvoj energetske zajednice kao aktivna mera za podsticaj pravedne energetske tranzicije u Republici Srbiji, Energija, ekonomija, ekologija, Vol 24, No.2, pp. 33-39, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-2.33P>

AUTORI/AUTHORS

Miroslav Parović – dr tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za industrijsko inženjerstvo i menadžment, miroslav.parovic@gmail.com, ORCID [0000-0002-9891-4876](https://orcid.org/0000-0002-9891-4876)

Could Artificial Intelligence (AI) Contribute to a Just Energy Transition?

Abstract – The level of fairness of the energy transition mainly depends on the balance of the energy trilemma in the observed country. Artificial intelligence (AI) and machine learning have the potential to improve the overall performance of the energy system. The advantage of these technologies is that they can be applied in the energy production and consumption sectors, which can maximize energy efficiency and thus reduce the level of primary energy consumption. Likewise, AI can be used to increase the level of flexibility of the power system, enabling greater inclusion of renewable sources. All this affects the reduction of emissions, which represents one of the most important norms in reaching the goals of decarbonization of the economy. In addition to the above, AI could be used to improve the reliability of energy systems and reduce the overall costs of their exploitation.

There are also significant limitations in the application of artificial intelligence. First of all, there is currently a rather big problem with the adequate workforce needed for further development, which creates a certain "bottleneck" in the application in the energy sector. Also, AI's electricity consumption is not negligible, which potentially represents an additional load on production capacities.

The goal of the research is to make an overview of the current applications of AI in the energy sector and to give a critical review of the impact on energy justice using those specific examples. In the research, communication with the publicly available tool based on artificial intelligence, ChatGPT, will be used in order to reach a certain set of information about the topic of interest. In this way, AI will be directly involved in the research in such a way that a set of specific questions will be asked in ChatGPT, and the answers obtained will be integral part of the final paper.

Index Terms – Energy Justice, Artificial Intelligence (AI), Energy Transition

Uticaj individualnih ložišta na biomasu na zagađenost vazduha u urbanim sredinama

Vladimir Vukašinović, Dušan Gordić, Jelena Nikolić, Mladen Josijević, Davor Končalović

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Rezime - Korišćenje biomase, kao regionalno dostupnog obnovljivog izvora energije je jedan od ključnih koraka ka dekarbonizaciji i ostvarivanju održivog razvoja zemalja koje su u razvoju. Biomasa koja se koristi na održiv način smatra se ugljenično neutralnim gorivom. Zahvaljujući svojim svojstvima predstavlja energent koji može doprineti ostvarivanju cilja ugljenične neutralnosti. Iako, za razliku od fosilnih goriva, emituje niske emisije zagađujućih materija, kada se govori o kontrolisanom procesu potpunog sagorevanja, sve su češći problemi koji se javljaju usled neadekvatnog korišćenja biomase. U mnogim zemljama u razvoju, biomasa, posebno drvna, se često koristi na tradicionalan i neefikasan način za kuvanje i zagrevanje prostora u ložištima sa minimalnom mogućnošću kontrole procesa sagorevanja. Takav neefikasan način korišćenja biomase može izazvati ozbiljne ekološke probleme. Nepotpuno sagorevanje drvne biomase može rezultirati emisijom štetnih supstanci, uključujući čestice (mešavina dima, čađi i kiselina) i ugljen-monoksid (CO). Ove supstance su opasne po zdravlje ljudi i imaju negativne efekte na kvalitet vazduha. Pored toga, sagorevanje biomase na visokim temperaturama može generisati azotne okside (NOx), čime se dodatno pogoršava ekološki uticaj. U Srbiji, prema popisu iz 2022. godine svega 20% stambenih jedinica povezano na sisteme daljinskog grejanja dok 77% čine individualni sistemi grejanja. Kod individualnih sistema grejanja 31% čine stanovi koji imaju instalacije grejanja. Od ukupnog broja nastanjenih stanova u gradskim sredinama koji nisu povezani na sistem daljinskog grejanja, drvo kao energent koristi 47,60 %, ugalj 2,07%, prirodni gas 17,40%, a električnu energiju 29,00%. U radu je analizirano 15 gradskih sredina u Srbiji kod kojih je vazduh kategorisan u III kategoriju kao posledica emisija PM_{2,5} i P₁₀ čestica. Sistemi daljinskog grejanja analiziranih gradova se zasnivaju na korišćenju prirodnog gasa (11 gradova), dok je ugalj preovlađujuće gorivo u tri grada i mazut u jednom gradu. U većini analiziranih gradovima individualni sistemi grejanja imaju udele najčešće preko 70% i zasnovani su najvećim delom na korišćenju čvrste biomase, iznad 60%. Dnevna prekoračenja emisija PM čestica, koja su višestruko iznad dozvoljene granice, su u preko 95% u toku grejne sezone.

Ključne reči - biomasa, kvalitet vazduha, emisije, individualna ložišta

I UVOD

Urbana područja širom sveta suočavaju se s problemom zagađenja vazduha, što predstavlja ozbiljan izazov za javno zdravlje i životnu sredinu. Nivo zagađenja vazduha, odnosno koncentracije polutanata značajno variraju u gradovima u

zavisnosti od geografskih lokacija i dominantnih izvora zagađenja [1]. Jedan od značajnijih izvora zagađujućih materija je generisanje energije za različite aktivnosti, jer je dostupna energija jedan od preduslova ekonomskih napretka i održivog razvoja savremenog društva. Fosilna goriva koja predstavljaju okosnicu većine energetske sistema moraju biti zamenjena, pre svega, obnovljivim ugljenično-neutralnim gorivima koja bi trebalo da obezbede minimalan uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi i da njihovo korišćenje bude ekonomski opravdano [2]. Biomasa se, kao široko dostupni obnovljivi izvor energije (OIE) i zahvaljujući fizičko-hemijskim karakteristikama, smatra jednim od važnih činilaca ka dekarbonizaciji i ostvarivanju i osnaživanju održivog razvoja. Odnosno biomasa je prepoznata kao važan deo rešenja za ublažavanje klimatskih promena, jer nudi obnovljivu alternativu fosilnim gorivima [3]. Biomasa je OIE koji, nakon odgovarajućih transformacija, može koristiti na način sličan korišćenju fosilnim gorivima. Prednost biomase je u odnosu na npr. ugalj, što biomasa emituje 90% manje sumpornih oksida (SOx) prilikom sagorevanja.

Iako, za razliku od fosilnih goriva, emituje niske emisije zagađujućih materija, kada se govori o kontrolisanom procesu potpunog sagorevanja, sve su češći problemi koji se javljaju usled neadekvatnog korišćenja biomase, odnosno upotrebe zastarelih i neefikasnih tehnologija. U mnogim zemljama u razvoju, biomasa, posebno drvna, se često koristi na tradicionalan i neefikasan način za kuvanje i zagrevanje prostora, sagorevanjem u pećima sa minimalnom mogućnošću kontrole procesa. Takav neefikasan način korišćenja biomase može izazvati ozbiljne ekološke probleme [4]. Sagorevanje čvrste biomase emituje različite zagađivače, uključujući čestice (PM) i ugljen-monoksid (CO), što predstavlja značajnu pretnju i ljudskom zdravlju i životnoj sredini [5]. Ove supstance su opasne po zdravlje ljudi i imaju negativne efekte na kvalitet vazduha. Procene su da je zagađen vazduh odgovoran za 7 miliona prevremenih smrti širom sveta [6], od čega je oko 4 miliona izazvano PM_{2.5} česticama [7].

Zbog toga su, kao jedan od najznačajnijih izvora zagađenja u urbanim područjima, identifikovana individualna ložišta na biomasu koje se često koriste za zagrevanje i pripremu hrane u domaćinstvima [8]. Procene su pokazale da sve veća upotreba sagorevanja drveta u stambenom sektoru ima negativne efekte na zdravlje lokalnog stanovništva zbog velikog uticaja na kvalitet vazduha [9]. Petracchini [2] i ostali su u svom radu pratili koncentracije različitih zagađujućih materija u vazduhu (PM₁₀, poliaromatičnih ugljovodonika, NO_x, SO₂, etc) kako bi procenili uticaj sagorevanja biomase u stambenom sektoru. Sagorevanje biomase je identifikovano kao glavni izvor poliaromatičnih

ugljovodonika. Kako bi pokazali uticaj sagorevanja biomase na kvalitet vazduha u Novom Sadu, Nestorović i saradnici [10] su sprovedli studiju koja je imala za cilj utvrđivanje emisija zagađujućih materija koje vode poreklo od sagorevanja biomase u stambenom sektoru Grada Novog Sada u periodu od 11 godina. Rezultati su pokazali da domaćinstva doprinose više od 97% emisija CO i PM (eng. Particulate Matter) u stambenom sektoru. Više od 81% CO i 90% PM se formira direktno sagorevanjem biomase. Kako bi se ublažile posledice koje emisije zagađujućih materija u vazduh, a pre svega PM_{2.5} čestica imaju na zdravlje ljudi, u radu [11] je analiziran predlog modela mašinskog učenja za predviđanje koncentracije suspendovanih čestica u vazduhu. Kako bi se biomasa kao održiv OIE koristila na adekvatan način i kako bi se negativan uticaj na kvalitet vazduha minimizovao neophodno je omogućiti energetska tranzicija domaćinstava. U radu [12] prikazano je istraživanje kroz koje su kreirani simulacioni modeli koji za upravljanje energetskom tranzicijom domaćinstava i prelazak ka modernim tehnologijama.

U sektoru domaćinstava u Srbiji dominiraju individualni sistemi grejanja, pre svega bazirani na čvrstim gorivima (peći i šporeti na ogrevno drvo i ugalj) i na električnoj energiji. Analiza koju su sprovedli Pavlović i ostali [13] pokazuje da u trenutnoj strukturi sistema grejanja, dominantni energent je ogrevno drvo (blizu 60%), zatim električna energija, prirodni gas, pelet i ugalj. Na osnovu godišnjih izveštaja o stanju kvaliteta vazduha u Republici Srbiji u periodu 2020-2022 vazduh je u više gradova i opština bio III kategorije usled povećanih koncentracija zagađujućih PM_{2.5} i PM₁₀ čestica [14]. Kako bi se jasnije identifikovao uticaj sagorevanja biomase u individualnim ložištima u sektoru domaćinstava, u ovom radu je izvršena analiza uticaja na povećanje koncentracije zagađujućih materija u urbanim sredinama u Srbiji. Dobijeni rezultati omogućavaju jasnu identifikaciju izazova sa kojim se suočava sektor domaćinstava i njegov uticaj na životnu sredinu. Ovi rezultati mogu predstavljati osnovu za razvoj strategija i akcionih planova za unapređenje stanja životne sredine, kako na lokalnom, tako i na nacionalnom nivou.

II MATERIJAL I METOD

Koncentracije zagađujućih materija u vazduhu u Srbiji prate se preko više stotina mernih uređaja i stanica u velikom broju gradova i opština u Srbiji. Agencija za zaštitu životne sredine Ministarstva za zaštitu životne sredine u saradnji sa partnerima pokrenula je mrežu od 75 mernih stanica koje mere koncentracije zagađujućih materija u vazduhu u 29 naseljenih mesta u Srbiji [15]. Pored mreže državnih mernih stanica, kvalitet vazduha, odnosno koncentracije zagađujućih materija prate se i preko individualnih mernih uređaja koji publikuju podatke u različitim javno dostupnim bazama podataka kao što su, aplikacija xEco Vazduh [16], Sensor community [17], Klimerko [18], PurpleAir [19], IQAir [20], AqiCN [21]. U tabeli 1, prikazan je broj mernih stanica koje mere koncentracije zagađujućih materija u gradovima i opštinama u Srbiji i čiji se podaci sistematizuju u okviru aplikacije xEco Vazduh.

Na osnovu izmerenih vrednosti, vazduh se može klasifikovati u 6 opisnih kategorija (dobar, prihvatljiv, srednji, loš, veoma loš i izuzetno loš). Rasponi izmerenih koncentracija u pojedinim kategorijama se razlikuju u zavisnosti od vrste zagađujućih

materija. Vrednosti graničnih emisija za dvadesetčetvoročasovno osrednjavanje emisija PM_{2.5} [µg/m³] i indeksa kvaliteta vazduha (AQI) prikazani su tabeli 2.

Tabela 1. Broj mernih stanica sistematizovanih u aplikaciji xEco Vazduh

Baza podataka	Broj mernih uređaja
Sensor community	124
Klimerko	226
WeatherLink	2
PurpleAir	4
AqiCN	3
IQAir	14

Tabela 2. Granične vrednosti emisija i prateće oznake

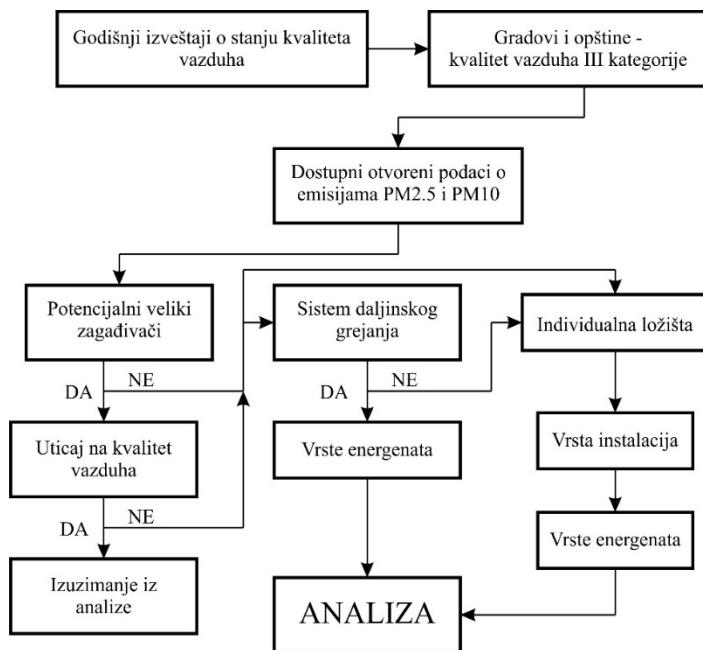
PM _{2.5}	AQI	Opis
0-12	0-50	Dobar
12-35	51-100	Srednji
35-55	101-150	Nezdravo (za osetljive osobe)
55-150	151-200	Nezdravo
150-250	201-300	Veoma nezdravo
>250	>300	Opasan

Uredbom o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha [22], definisane su, između ostalog, granične vrednosti nivoa zagađujućih materija u vazduhu, gornje i donje granice ocenjivanja nivoa zagađujućih materija u vazduhu, granice tolerancije i tolerantne vrednosti, koncentracije opasne po zdravlje ljudi i koncentracije o kojima se izveštava javnost i kritični nivoi zagađujućih materija u vazduhu.

Da bi se analizirao potencijalni uticaj sagorevanja čvrste biomase u individualnim ložištima na zagađenost vazduha, neophodno je poznavanje sistema grejanja i energenata koji se koriste po gradovima i opštinama u Srbiji. Nekoliko analiza i studija u vezi sa procenom udela pojedinih sistema sprovedeno je u prethodnom periodu, zasnovano na različitim metodologijama [13,23,24]. Popisom stanovništva, domaćinstava i stanova iz 2022. godine, objavljeni su podaci o opremljenosti stanova instalacijama električne energije, vodovoda, kanalizacije, grejanja i gasovoda [25]. Takođe objavljeni su i podaci o korišćenju energenata u nastanjenim stanovima bez centralnog grejanja, prema vrsti energenta koji se koristi. Sa druge strane, kada se govori o sistemima daljinskog grejanja, Poslovno udruženje „Toplane Srbije“ objavljuje godišnje izveštaje o radu sistema daljinskog grejanja u Republici Srbiji, koje sadrži podatke o utrošenim energentima za svaku toplanu koja je u članica udruženja [26].

Na slici 1. prikazana je metodologija na osnovu koje je sprovedena analiza uticaja individualnih ložišta koja koriste čvrstu (drvnu) biomasu kao energent na zagađenost vazduha u urbanim sredinama. Osnova za analizu su Godišnji izveštaji o stanju kvaliteta vazduha [14] u kojima su gradovi i opštine svrstani u neku od tri kategorije prema kvalitetu vazduha. Određen broj gradova i opština, kod kojih su prekoračene dozvoljene granice emisija je svrstan u III kategoriju. Za ove gradove i opštine je izvršena provera dostupnosti podataka o emisijama PM_{2.5} i PM₁₀ čestica, a zatim su identifikovani

potencijalno veliki zagađivači (pre svega industrijski) koji su van stambenog sektora. Ukoliko je u nekom od opština ili gradova identifikovan potencijalni zagađivač, prema predloženoj metodologiji, najpre se analizira uticaj ovog izvora emisija na kvalitet vazduha i u slučaju da je procenjeni uticaj veliki, opština ili grad su izuzimaju iz dalje analize. U slučaju kada nije identifikovan potencijalno veliki zagađivač ili je uticaj na kvalitet vazduha minimalan, prelazi se na analizu sistema grejanja, odnosno paralelno se analiziraju udeli sistema daljinskog grejanja i individualnih sistema. Kod sistema daljinskog grejanja, akcentat se stavlja na analizu energenata koji se koriste i na njihov eventualni uticaj na zagađenost vazduha. Sa druge strane, individualni sistemi se prvo razmatraju sa stanovišta instalacija (da li postoje instalacije centralnog grejanja), a potom se razmatraju energenti i njihovi udeli.



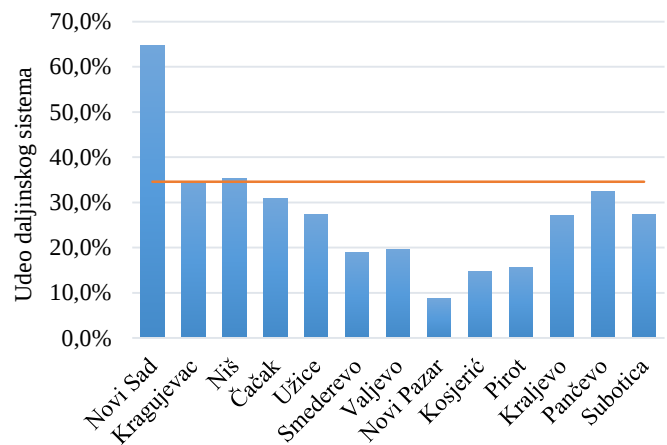
Slika 1. Metodologija za procenu uticaja individualnih ložišta na zagađenost vazduha

III REZULTATI

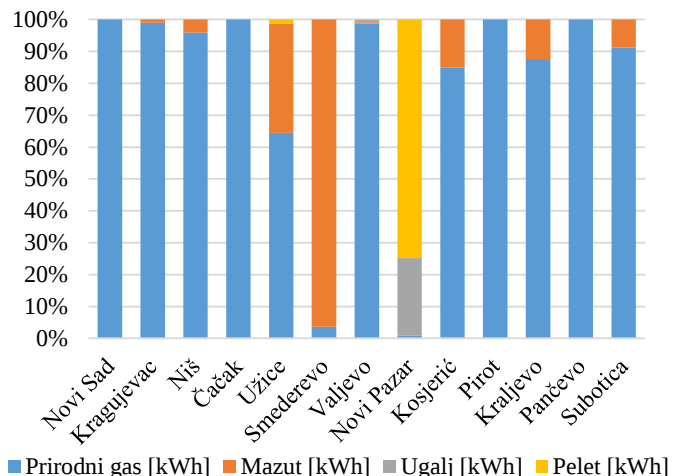
U periodu 2020-2022 godina, ukupno 23 grada i opštine su makar jednom bili svrstani u III kategoriju po kvalitetu vazduha, na osnovu godišnjih izveštaja koje izdaje Agencija za zaštitu životne sredine. Godišnji izveštaji o stanju kvaliteta vazduha sadrže podatke sa svih mernih stanica koje pripadaju državnoj mreži kao i podatke iz mreža jedinica lokalne samouprave. Prema metodologiji primenjenoj u izveštajima, utvrđene su tri kategorije kvaliteta vazduha. Treća kategorija podrazumeva gradove i opštine u kojima je vazduh prekomerno zagađen odnosno prekoračene se granične vrednosti za jednu ili više zagađujućih materija. U većini gradova i opština u kojima je vazduh III kategorije, osim u Boru i Beogradu, uzrok zagađenja su visoke koncentracije PM2.5 i PM10 čestica. U Boru su kao dominantna zagađujuća materija identifikovani oksidi sumpora (SOx), dok su u Beogradu jedan od uzročnika zagađenja bili oksidi azota (NOx).

Na osnovu prikazane metodologije za procenu uticaja individualnih ložišta na zagađenost vazduha za gradove i opštine u kojima je vazduh svrstan u III kategoriju po kvalitetu, izvršene su provere dostupnosti otvorenih podataka o emisijama PM2.5 i PM10 čestica, kako sa državnih mernih stanica tako i sa individualnih mernih uređaja. Zatim su analizirani potencijalni veliki industrijski zagađivači i njihov uticaj na kvalitet vazduha, odnosno na emisije zagađujućih materija i odabrano 13 od 23 gradova i opština u kojima je vazduh klasifikovan u III kategoriju po kvalitetu. Za ove gradove i opštine postoje odgovarajući podaci u otvorenim bazama.

Udeo daljinskog grejanja u nastanjenim stanovima u urbanim sredinama analiziranih gradova i opštinama kreće se od 8,7% u Novom Pazaru do 64,8% u Novom Sadu. Prosečna povezanost nastanjenih stanova u urbanim sredinama u Republici Srbiji na sisteme daljinskog grejanja je 34,6% (slika 2). Podaci sa slike 2 pokazuju da je u većini analiziranih gradova i opština zastupljenost daljinskog grejanja manja od prosečnih vrednosti za Srbiju. Sa druge strane, stanovi koji nisu povezani na sistem daljinskog grejanja, imaju individualne sisteme za generisanje toplote i udeo ovih sistema se kreće od 34,6% u Novom Sadu do 90,3% u Novom Pazaru [25].

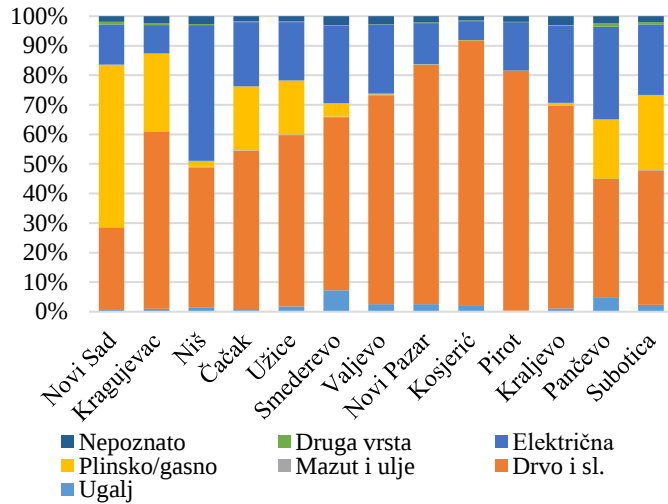


Slika 2. Udeo sistema daljinskog grejanja u nastanjenim stanovima u urbanim sredinama [25]



Slika 3. Korišćeni energenti u sistemima daljinskog grejanja [25]

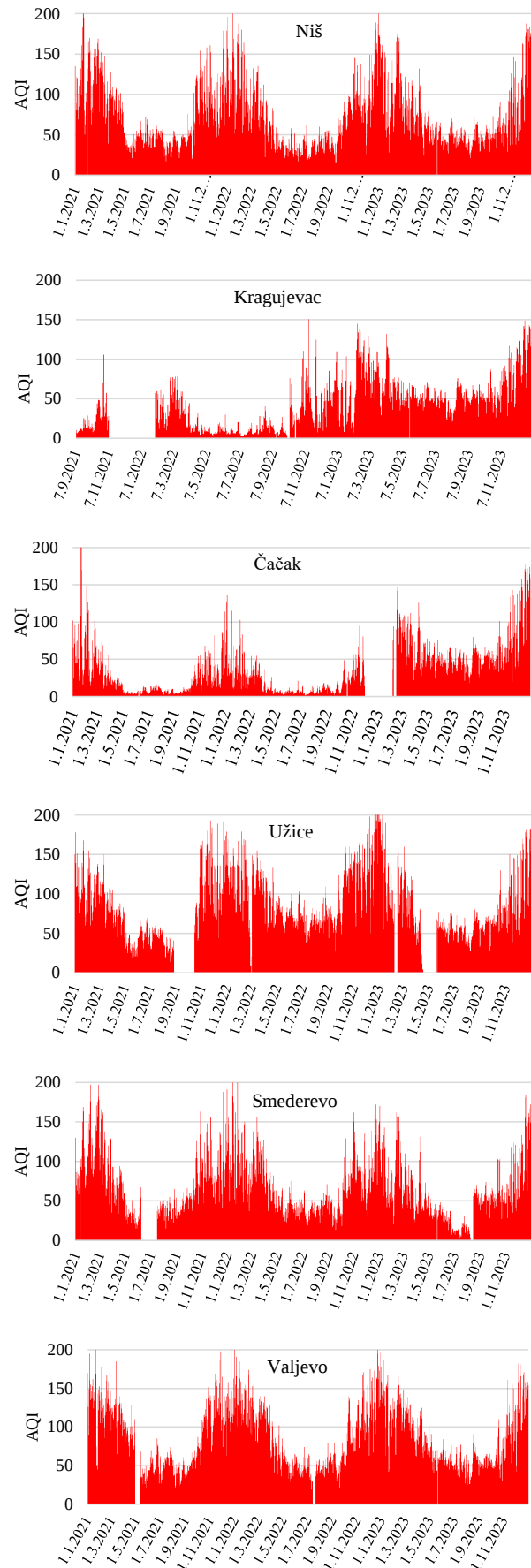
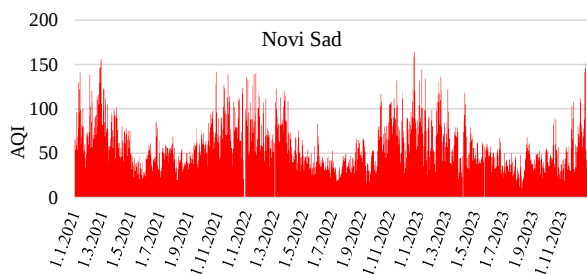
Prirodni gas je dominantan energent kada se radi o sistemima daljinskog grejanja u 11 od 13 analiziranih gradova i opština, pri čemu su mazut i pelet preovlađujući u preostale dve opštine Smederevu i Novom Pazaru (slika 3). U Kragujevcu je ugalj bio dominantni energent do oktobra 2022. godine, kada je celokupan sistem prešao na upotrebu prirodnog gasa, dok je Novi Pazar iste godine prešao na pelet.

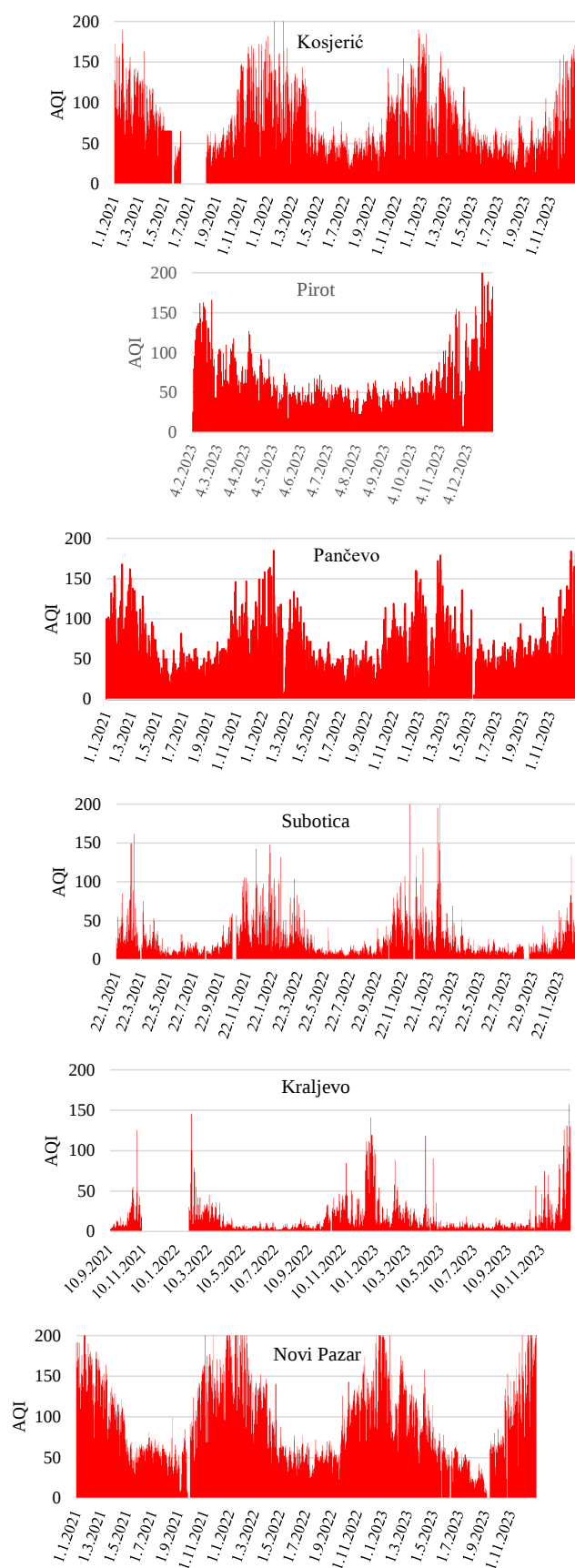


Slika 4. Udeo pojedinih energenata u individualnim sistemima [25]

Nastanjeni stanovi koji se zagrevaju individualnim sistemima grejanja mogu se razvrstati na one sa instalacijama centralnog grejanja i bez instalacija (grejanje na pojedinačne uređaje). Kod individualnih sistema grejanja u većini analiziranih gradova i opština, biomasa zauzima pojedinačno najveći udeo osim u Novom Sadu, gde je prirodni gas dominantan energent. Udeli biomase se kreću od 40,25% u Pančevu, do 89,30% u Kosjeriću (slika 4). Poređenjem podataka sa slika 2 i 4, može se zaključiti da je u gradovima i opštinama koji imaju male udele sistema daljinskog grejanja u zagrevanju nastanjenih stanova drvna biomasa glavni energent za generisanje toplote.

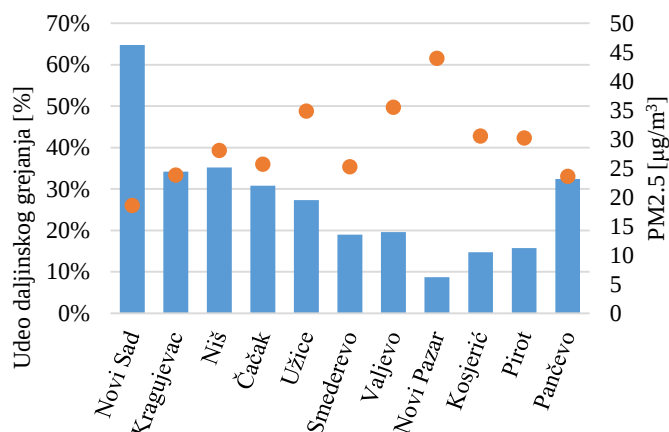
Za analizirane gradove i opštine, na slici 5, prikazane su vrednosti indeksa kvaliteta vazduha, baziranog na koncentraciji čestica PM_{2.5} prema podacima iz baze AqiCN [21]. Vrednosti AQI i njihova vremenska raspodela pokazuju da u većini analiziranih gradova i opština emisije imaju sezonski karakter, odnosno da su povišene vrednosti u toku grejne sezone. Ovo je posebno izraženo kod gradova i opština koje imaju mali broj stambenih jedinica povezanih na sistem daljinskog grejanja, odnosno tamo gde dominiraju individualni sistemi, odnosno individualna ložišta na biomasu.



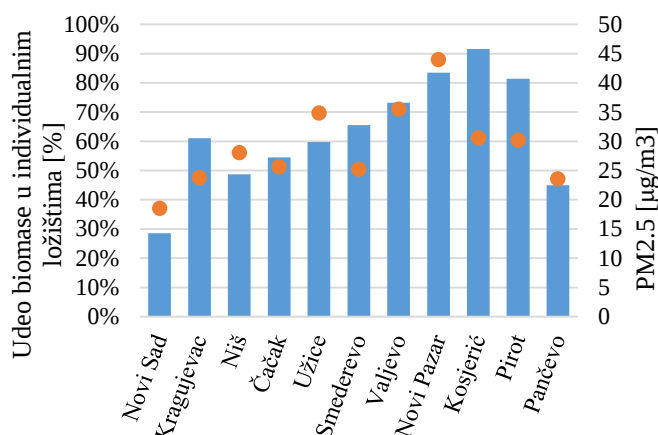


Slika 5. Dnevne vrednosti AQI za analizirane gradove i opštine [21]

Prosečne godišnje emisije čestica PM_{2.5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] [16] su takođe najveće u gradovima i opštinama gde su udeli daljinskog grejanja mali i gde je drvena biomasa dominantan energent u individualnim ložištima, slike 6 i 7 (za Kraljevo i Suboticu nije bilo relevantnih podataka).



Slika 6. Uporedni prikaz uдела daljinskog grejanja i prosečnih godišnjih emisija PM_{2.5} čestica



Slika 7. Uporedni prikaz uдела drvene biomase u individualnim ložištima i prosečnih godišnjih emisija PM_{2.5} čestica

IV ZAKLJUČAK

Sprovedena analiza pokazuje da zagađenje vazduha, odnosno nivoi emisija, u analiziranim gradovima i opštinama, a koji su prema kriterijumima Agencije za zaštitu životne sredine svrstani u III kategoriju, ima izraženo sezonski karakter. Povećanje koncentracija zagađujućih materija je značajno veće tokom grejne sezone, a posebno u gradovima i opštinama gde su udeli daljinskog grejanja mali, odnosno gde je biomasa (ogrevno drvo) dominantan energent u individualnim ložištima. U gradovima koji imaju najveća prosečna godišnja zagađenja (Užice, Valjevo, Novi Pazar, Kosjerić i Pirot) biomasa ima ukupne udele u grejanju stambenih jedinica od 50% do 78%.

Značajan faktor koji doprinosi negativnom uticaju upotrebe, pre svega, ogrevnog drveta na kvalitet vazduha je relativno veliki udeo stambenih jedinica bez instalacija centralnog grejanja. Za analizirane gradove i opštine ovaj udeo iznosi 32% izuzimajući

Novi Sad, u kome je udeo ispod 10%.

Iako prikazani rezultati pokazuju blisku vezu između korišćenja biomase u individualnim ložištima i povećanog zagađenja vazduha, potrebno je, u cilju donošenja preciznijih zaključaka, analizirati i dodatne faktore koji mogu imati uticaj, kao što su brzina vetra, relativna vlažnost i temperatura, količina padavina i atmosferski pritisak. Veza između navedenih meteoroloških faktora, njihovo dugoročno praćenje i definisanje njihove međusobne povezanosti, uzimajući u obzir geografske karakteristike regiona, može se koristiti u cilju izrade modela za predviđanje i upravljanje kvalitetom vazduha.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-66/2024-03/ 200107 od 05.02.2024. godine

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Li, X., Jin, L., Kan, H. Air pollution: a global problem needs local fixes, *Nature*, Vol 570, pp. 437-439, 2019. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01960-7>
- [2] Petracchini, F., Romagnoli, P., Paciucci, L., Vichi, F., Imperiali, A., Paolini, V., Liotta, F., Cecinato, A. Influence of transport from urban sources and domestic biomass combustion on the air quality of a mountain area. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, pp. 4741-4754, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8111-1>
- [3] Cornette, J.F.P., Dyakov, I.V., Blondeau, J., Bram, S. Accurate particulate matter emission measurements from biomass combustion: A holistic evaluation of full and partial flow dilution systems, *Environmental Research*, Vol. 236, Part 1, 116714, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116714>
- [4] Paardekooper, S., Lund, H., Chang, M., Nielsen, S., Moreno, D., Thellufsen, J.Z. Heat Roadmap Chile: A national district heating plan for air pollution decontamination and decarbonisation, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 272, 122744, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122744>
- [5] Karanasiou, A., Alastuey, A., Amato, F., Renzi, M., Stafoggia, M., Tobias, A., Reche, C., Forastiere, F., Gumy, S., Mudu, P., Querol, X. Short-term health effects from outdoor exposure to biomass burning emissions: A review, *Science of The Total Environment*, Vol. 781, 146739, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146739>
- [6] Orru, H., Ebi, K.L., Forsberg, B. The Interplay of Climate Change and Air Pollution on Health, *Current Environmental Health Reports*, Vol. 4, pp. 504-513, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0168-6>
- [7] Nansai, K., Tohno, S., Chatani, S., Kanemoto, K., Kagawa, S., Kondo, Y., Takayanagi, W., Lenzen, M. Consumption in the G20 nations causes particulate air pollution resulting in two million premature deaths annually, *Nature Communications*, Vol. 12, No. 6286, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26348-y>
- [8] Akagi, S.K., Yokelson, R.J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M.J., Reid, J.S., Karl, T., Crounse, J.D., Wennberget, P.O. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, *Atmospheric Chemistry Physics*, Vol. 11, No. 9, pp. 4039-4072, 2011. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
- [9] Johnston, F.H., Hanigan, I.C., Henderson, S.B., Morgan, G.G. Evaluation of interventions to reduce air pollution from biomass smoke on mortality in Launceston, Australia: retrospective analysis of daily mortality, 1994-2007. *British publisher of medical journals*, Vol. 346, pp. 8446-8446, 2013. <https://doi.org/10.1136/bmj.e8446>
- [10] Nesterovic, A., Djatkovic, D., Viskovic, M., Martinov, M., Adamovic, D. Air pollutants emissions from biomass combustion in the City of Novi Sad, Serbia, *Biomass Conversion and Biorefinery*, Vol. 13, pp. 10935-10946, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01882-3>
- [11] Nastić, F. Predlog modela za predviđanje koncentracije suspendovanih (PM_{2.5}) čestica u vazduhu, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 39-44, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-3.39N>
- [12] Pavlović, B. Osaživanje energetske tranzicije u sektoru domaćinstva u Srbiji: Integrativni pristup, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 2, pp. 1-9, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.01P>
- [13] Pavlović, B., Ivezić, D., Živković, M. Challenges of Energy Transition in the Individual Heating Sector, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 17-21, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.17P>
- [14] Perunović Čulić, T., Knežević, J. *Godišnji izveštaji o stanju kvaliteta vazduha 2020-2022*, Ministarstvo zaštite životne sredine, Agencija za zaštitu životne sredine, Beograd, https://www.sepa.gov.rs/download/Vazduh_2022.pdf [pristupljeno 02.02.2024]
- [15] Agencija za zaštitu životne sredine. Objedinjeni prikaz automatskog monitoringa kvaliteta vazduha u Republici Srbiji. *Pregled Stanica* 2024. <http://www.amskv.sepa.gov.rs/pregledstanica.php> [pristupljeno 02.02.2024]
- [16] Nacionalna Ekološka asocijacija. xEco Vazduh. Xtreme ECOlogy" - Ekstremna Ekologija 2024. <https://xeco.info/xeco/vazduh/> [pristupljeno 02.02.2024]
- [17] Open Knowledge Foundation Germany. Sensor community 2024. <https://luftdaten.info/> [pristupljeno 02.02.2024]
- [18] Internet društvo Srbije. Klimerko 2024. <https://klimerko.org/map?pollutant=pm2&range=latest&year=2024&month=4&day=1&m=0&tz=-120&zoom=8&latitude=44.066&longitude=20.91> [pristupljeno 02.02.2024]
- [19] PurpleAir. Real-Time Air Quality Map 2024. <https://map.purpleair.com/1/mAQI/a10/p604800/cC0#11/44.8046/20.4637> [pristupljeno 02.02.2024]
- [20] IQAir. Air quality map 2024. <https://www.iqair.com/air-quality-map> [pristupljeno 02.02.2024]
- [21] The World AQI Project. Air quality network in Serbia 2024. <https://aqicn.org/station/country/rs/serbia/> [pristupljeno 02.02.2024]
- [22] Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha 2013. "Sl. glasnik RS", br. 11/2010, 75/2010 i 63/2013) <https://www.paragraf.rs/propisi/uredba-uslovima-monitoring-zahtevima-kvaliteta-vazduha.html> [pristupljeno 02.02.2024]
- [23] Glavonjic, B. Consumption of wood fuels in households in Serbia: Present state and possible contribution to the climate change mitigation, *Thermal Science*, Vol. 15, pp. 571-585, 2011. <https://doi.org/10.2298/TSCI1103571G>
- [24] Radovanović, P. Uporedna analiza sistema grejanja stambenih zgrada u Srbiji i zemljama Evropske unije, *Zbornik Radova Fakulteta Tehničkih Nauka u Novom Sadu*, Vol. 38, No. 3, pp. 319-322, 2023. <https://doi.org/10.24867/22AM03Radovanovic>
- [25] Republički zavod za statistiku. Popis stanovništva, domaćinstava i stanova 2022. godine - Instalacije u stanovima - Podaci po opštinama i gradovima 2023. <https://popis2022.stat.gov.rs/sr-latn/5-vestisaopstenja/news-events/20231012-instalacije/?a=0&s=0> [pristupljeno 12.02.2024]
- [26] Poslovno udruženje "Toplane Srbije". Izveštaji o radu sistema daljinskog grejanja u Republici Srbiji za 2020-2022. godinu. Šabac: 2021. https://www.toplanesrbije.org.rs/uploads/ck_editor/files/izvestaji%202021.pdf [pristupljeno 12.02.2024]

AUTORI/AUTHORS

dr Vladimir Vukašinović - vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632)

dr Dušan Gordić - redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, gordic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1058-5810](https://orcid.org/0000-0002-1058-5810), autor za korepodenciju

msr Jelena Nikolić – istraživač saradnik, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, jelena.nikolic@fink.rs, ORCID [0000-0001-6781-8059](https://orcid.org/0000-0001-6781-8059)

dr Mladen Josijević - docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, mladen.josijevic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)

dr Davor Končalović – vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, davor.koncalovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-1207-2653](https://orcid.org/0000-0003-1207-2653)

The Impact of Biomass-Fired Stoves on Air Pollution in Urban Areas

Abstract – The usage of biomass as a regionally available renewable energy source is one of the key steps towards decarbonisation and the achievement of sustainable development. Biomass used in a sustainable way is considered as a carbon-neutral fuel. Due to its properties, it is considered an energy source that can help achieve carbon neutrality. Although, compared with fossil fuels biomass results in lower pollutant emissions during a controlled complete combustion process, problems arising from inadequate use of biomass are becoming more common. In many developing countries, biomass, especially wood, is often used in a traditional and inefficient way for cooking and space heating in stoves with minimal control possibilities over the combustion process. Such an inefficient way of using biomass can cause serious environmental problems. The incomplete combustion of woody biomass can result in the emission of harmful matters, including particulate matter (a mixture of smoke, soot and acid) and carbon monoxide (CO). These substances are dangerous to human health and have negative effects on air quality. In addition, burning biomass at high temperatures can generate nitrogen oxides (NOx), further exacerbating the environmental impact. According to the 2022 census, just 20% of dwellings are connected to district heating systems, while 77% have individual heating systems (31% of individual systems are dwellings with central heating installations) in Serbia. Of the total of occupied dwellings in urban areas that are not connected to the district heating system, 47.60% use wood, 2.07% coal, 17.40% natural gas, and 29.00% electricity for space heating. In the paper, 15 urban areas in Serbia with III category of air quality have been analysed. The district heating systems of the analysed cities are based on natural gas usage (11 cities), while coal is the predominant fuel in three cities and heating oil in one city. Individual heating systems often account for more than 70% of the total share in most of the analysed cities, and they are mostly fuelled by solid biomass. Daily excesses of PM particle emissions, which are several times above the limit, are over 95% during the heating season.

Index Terms – Biomass, Air quality, Emissions, Individual heating systems

Detekcija i kontrola struje curenja solarnih invertora

Željko V. Despotović*, Miodrag Vuković**

* Institut „Mihajlo Pupin“, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

** CONSEKO d.o.o, Beograd, Srbija

Rezime - Struja curenja u fotonaponskim (FN) sistemima, koja je takođe poznata kao rezidualna struja ili „leakage current“ (engl.) je posledica parazitnog kapaciteta između FN sistema i zemlje (FN elektrane na tlu) ili FN sistema i konstrukcije objekta koji je uzemljen (FN elektrane na krovu objekta). Kada parazitna kapacitivnost između FN sistema i elektroenergetске mreže formira petlju, napon zajedničkog moda će proizvesti struju zajedničkog moda na parazitnoj kapacitivnosti. Motivacija za pisanje ove kratke studije je potekla iz prakse gde su se autori suočili sa pomenutim problemom na konkretnoj FN elektrani izlazne snage 10kW. Stoga će glavna tema u radu biti topologije solarnih invertora i njihov dodatni uticaj na rezidualnu struju, kao i načini njene detekcije. Takođe biće dat pregled relevantnih standarda u ovoj oblasti i neke moguće tehnike za kontrolu struja curenja u FN sistemima sa solarnim invertorima.

Gljučne reči - FN elektrane, parazitna kapacitivnost, rezidualna struja, FN inverter, diferencijalna zaštita

I UVOD

Ozbzirom na strukturu i mehaničke dimenzije, fotonaponski (FN) paneli (eng. „photovoltaic“-PV), bilo da su montirani na tlu ili na krovovima zgrada, uvek imaju izvesnu kapacitivnost prema zemlji ili bliskim uzemljenim metalnim delovima. Ova kapacitivnost nije neophodna za funkcionisanje pojedinačnog FN panela ili niza FN panela (stringova). Ona suštinski potiče od konačnih dimenzija i mehaničke strukture solarnih modula, ali i zavisi i od načina njihove instalacije i ugradnje. U praksi se često ovaj kapacitet naziva „parazitni“ obzirom da postoji, a nema uticaj na funkcionalni rad FN nizova. Ovaj kapacitet je proporcionalan površini solarnih panela, a obrnuto proporcionalan rastojanju između solarnih panela i zemlje ili uzemljenih metalnih delova. Stoga FN niz ili više njih (kao na primer jedna FN elektrana) pokazuju relativno veliku parazitnu kapacitivnost prema „zemlji“. Ona može biti dodatno povećana ako su površine pojedinačnih ili grupnih nizova FN panela vlažni, kao posledica kiše ili kondenzacije[1].

Pomenuti parazitni kapacitet ni na koji način ne utiče na izolacione karakteristike FN modula, međutim, može uticati na rad i ponašanje DC/AC pretvarača-invertora, koji su sastavni deo fotonaponskog sistema i koji su direktno preko DC strane galvanski povezani sa FN modulima. Ako se koriste invertori bez transformatora, kapacitivne struje, mogu da se pojave na AC strani invertora ili čak u AC napojnom vodu invertora, i tada se govori o tzv. preostalim (rezidualnim) strujama[1-2]. U jednom slučaju ova pojava prouzrokuje da se pod dejstvom automatske zaštite inverter privremeno isključuje sa mreže, pri čemu će se nakon određenog vremena ponovo vratiti na mrežno napajanje. U

drugom slučaju, dovod će biti prekinut sve dok se zaštitni uređaj za preostalu struju ručno ne aktivira (tzv. resetovanje zaštite). Prekidi ove vrste mogu se u velikoj meri sprečiti pažljivim i profesionalnim planiranjem sistema.

II FORMULACIJA PROBLEMA PARAZITNE KAPACITIVNOSTI

FN modul formira električno provodnu površinu koja je okrenuta prema uzemljenom nosećem okviru koji se nalazi obično na krovu objekta ili na metalnom nosaču montiranom na zemlji. Uprošćeni prikaz jednog ovakvog tipičnog detalja montaže FN modula je dat na Slici 1. Kompletan raspored FN modula ima odgovarajući parazitni kapacitet koji se sastoji od tri komponente: (1) C_1 - parazitni kapacitet vodenog ili kapljičastog sloja na površini FN modula u odnosu na sloj stakla, (2) C_2 - parazitni kapacitet FN modula prema uzemljenom nosećem ramu, (3) C_3 - parazitni kapacitet FN modula prema krovnoj konstrukciji [1-3].

Stoga je ukupna parazitna kapacitivnost $C_{PE}=C_1+C_2+C_3$. U praksi važi odnos $C_1 \gg C_2 \gg C_3$. Pomenute kapacitivnosti se mogu izračunati iz opšte relacije:

$$C=\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S/d \quad (1)$$

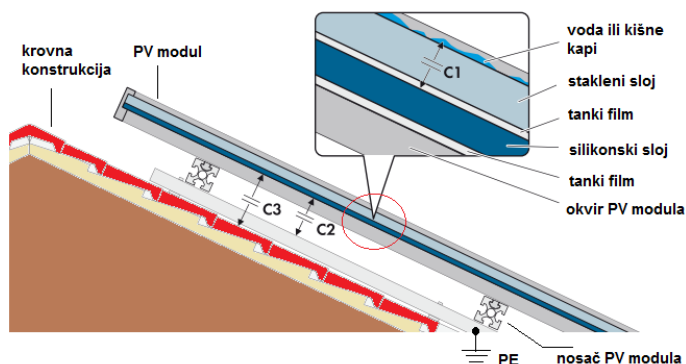
gde su:

ϵ_0 - dielektrična konstanta vazduha ($8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm),

ϵ_r - relativna dielektrična konstanta dielektrika (za staklo $\epsilon_r = 5 \div 10$)

S - površina FN modula ili grupe modula, [m²]

d - karakteristična rastojanja između pojedinih površina [m].



Slika 1. Prikaz parazitnih kapacitivnosti FN modula na krovnoj konstrukciji [1]

Obično u kišnim i vlažnim uslovima ukupnim kapacitetom C_{PE} dominira C_1 , tako da se u tom slučaju C_2 i C_3 mogu zanemariti. U suvim uslovima, s druge strane, C_1 je toliko mali da se ova druga dva moraju uzeti u obzir.

Treba napomenuti da je u svim slučajevima ukupni kapacitet C_{PE} toliko mali da je bilo koji uticaj na radno ponašanje fotonaponskog sistema zanemarljiv. Ipak najveći uticaj na struje curenja invertora ima vrednost C_1 tokom kišnih i vlažnih uslova (slučaj kondenzacije vlage je tipičan), te će ona stoga biti predmet daljeg razmatranja u ovom radu. Primer procene parazitne kapacitivnosti C_{PE} za Tip1 - standardni (monokristalni i polikristalni) FN modul i za Tip2 - modul na bazi tankog filma su dati u Tabeli 1[1-2].

Tabela 1. Tipične vrednosti parazitne kapacitivnosti

Tip	Efikasnost (%)	Debljina stakla (mm)	Kapacitivnost /m ² (nF)	Kapacitivnost /kW instalisane DC snage (nF)	Kapacitivnost /100 kW instalisane DC snage (μF)
1	15÷20	3÷4	12÷17	60÷110	6÷11
2	10÷15	2÷3	16	100÷160	10÷16

Praktične vrednosti struje curenja I se mogu dobiti iz izraza za efektivnu vrednost:

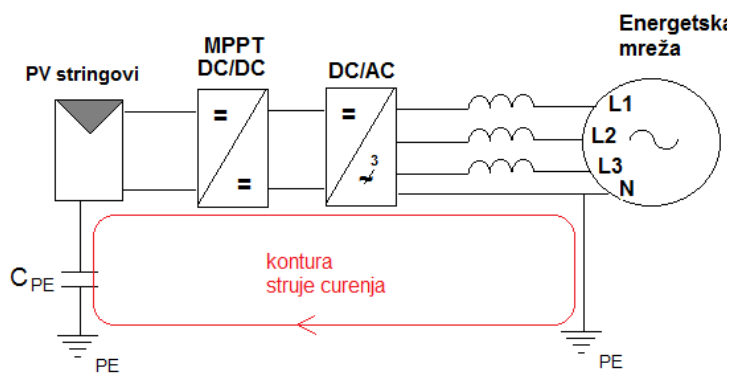
$$I = \omega \cdot C \cdot U = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U \quad (2)$$

Za $U=230V$, $f=50Hz$ i $C=8\mu F$ (tipično za FN elektranu 100 kW sa monokristalnim FN modulima) dobija se da je efektivna vrednost struje curenja 577 mA.

Ova struja curenja je reaktivna i njen fazni pomeraj je 90° u odnosu na linijski napon. U prvoj aproksimaciji ova struja ne prouzrokuje bilo kakve gubitke, međutim može uticati na rad invertora koji je povezan na elektroenergetsku mrežu.

III UTICAJ SPREGE INVERTOR-ELEKTROENERGETSKA MREŽA

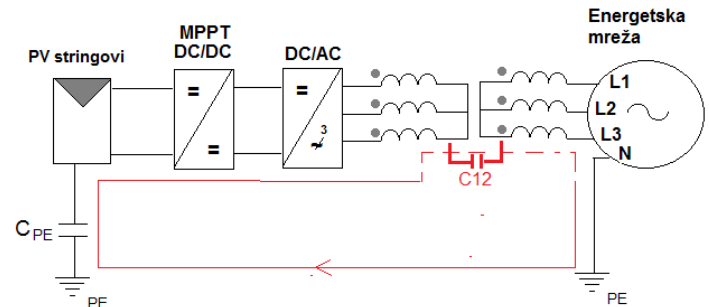
Tokom rada FN moduli su povezani na AC mrežu preko invertorskog pretvarača bez transformatora, kao što pokazuje Slika 2.



Slika 2. Kontura struje curenja usled parazitne kapacitivnosti niza FN modula-neizolovan invertorski sistem

Kada se formira petlja između parazitnog kapaciteta C_{PE} fotonaponskog sistema (kućnog priključka) i električne mreže (sabirnice PE), u ovom FN sistemu, impedansa petlje je relativno mala, a zajednički napon ("common mode voltage") formira relativno veliku zajedničku struju ("common mode current"), odnosno struju curenja kroz parazitnu kapacitivnost. Na ovaj način deo amplitude naizmeničnog napona stiže do FN

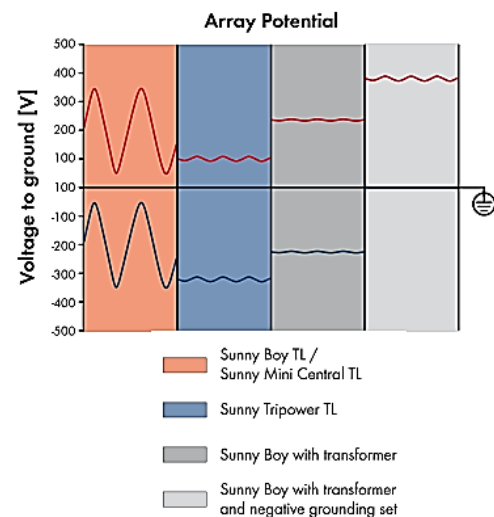
modula. Kao rezultat ovog, kompletan FN niz (string) „pliva“ na naizmeničnom potencijalu u odnosu na ostatak kola. Slično se dešava za kada je inverter povezan na mrežu preko transformatora (Slika 3), ali je u tom slučaju parazitna struja manja jer se u zajedničku konturu ubacuje i izolaciona kapacitivnost C_{12} između primara i sekundara.



Slika 3. Kontura struje curenja usled parazitne kapacitivnosti niza FN modula-izolovan invertorski sistem preko mrežnog transformatora

U skoro svim monofaznim invertorima bez transformatora, iz operativnih razloga, polovina amplitude mreže se prenosi na fotonaponski modul. U mnogim evropskim mrežama sa 230 V/50 Hz, ovaj raspored osciluje, na primer, na 115 V/50Hz. Ovo se odnosi na pretvarače *Sunny Boy* i *Sunny Mini Central* sa sufixom "TL" u nazivu proizvoda [1-2].

Kod trofaznih invertora bez transformatora, iz sistemskih razloga, oscilacije su znatno manje amplitude u odnosu na monofazni slučaj i kao rezultat toga, stvaraju se manje struje curenja. Prolaz naizmeničnog napona do fotonaponskog modula je u velikoj meri potisnut, ali i dalje postoji. Ovo se odnosi na sve *Sunny TriPower* invertore[1-2].



Slika 4. Potencijali u MPP sistemu 400V za nekoliko tipova invertora proizvođače SMA [4]

U invertorima sa transformatorima, napon unutar FN modula osciluje poput "talasanja" od samo nekoliko volti. Ovo daje porast do malog naizmeničnog AC napona u odnosu na PE (odnosno „zemlju“) koji, međutim, nije ujednačen preko celog FN niza. Ovaj fluktuirajući napon konstantno menja stanje

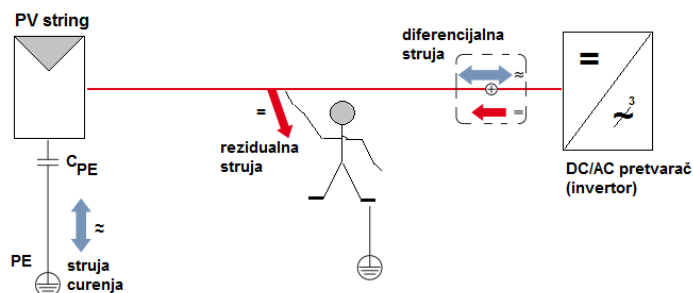
napunjenosti parazitnog kondenzatora C_{PE} opisanog u prethodnom odeljku. Ovo je povezano sa strujom pomeranja, koja je proporcionalna kapacitivnosti i amplitudi primenjenog napona.

Potencijal najnižeg FN modula (plava boja) ili najvišeg FN modula (crvena boja) u nizu (stringu) zavisi od korišćenog pretvarača, kao i od toga i da li je niz uzemljen. Primer za MPP napon od 400 V je dat na Slici 4 [1].

IV UTICAJ STRUJE CURENJA NA REZIDUALNU STRUJU

Kapacitivna struja curenja opisana u poglavlju II je reaktivna struja, bez gubitka. Međutim, ako kvar kao što je neispravna izolacija prouzrokuje da vod pod naponom dođe u kontakt sa uzemljenom osobom (Slika 5), dodatna struja će proticati u zemlju. Ova neželjena struja uzrokuje gubitke i naziva se *rezidualnom* strujom. Zbir ove dve struje (struja curenja i rezidualna struja) je *diferencijalna struja*. AC rezidualne struje veće od 30 mA mogu biti opasne po život

Da bi se obezbedila lična bezbednost, pored klase zaštite FN niza, invertori bez transformatora moraju biti isključeni sa energetske mreže odmah po pojavi rezidualne struje od 30 mA (DIN VDE 0126-1-1). U tu svrhu, tokom rada napajanja, diferencijalna struja (struja curenja + rezidualna struja) se meri pomoću jedinica za praćenje rezidualne struje ("*residual current monitoring unit*"- RCMU) koja je osetljiva na sve polove. Međutim, na ovaj način može samo da se meri diferencijalna struja (struja curenja + rezidualna struja). Moguće je samo u ograničenoj meri izvući rezidualnu struju, i to postaje sve teže sa povećanjem struje curenja. Od približno 50 mA naviše, slučajne fluktuacije u struji curenja postaju toliko velike da se mogu protumačiti kao iznenadni udari zaostalih struja od preko 30 mA. U takvim slučajevima, preventivno, inverter se automatski isključuje sa distributivne mreže[1-2], [4].



Slika 5. Formiranje preostale (rezidualne struje) usled oštećenja izolacije na DC strani

V STANDARDI I MERNE METODE

Prema standardima NB32004-2013, DIN VDE V 0-126-1-1:2006, IEC62109-2:2011, u slučajevima kada je solarni inverter priključen na mrežu naizmenične struje, a prekidač naizmenične struje isključen, pretvarač treba da obezbedi detekciju struje curenja. Detekcijom treba obuhvatiti otkrivanje ukupne struje (uključujući komponente jednosmerne i naizmenične struje), efektivnu vrednost struje, i rezidualnu struju u ustaljenom režimu. Ako stacionarna rezidualna struja prelazi

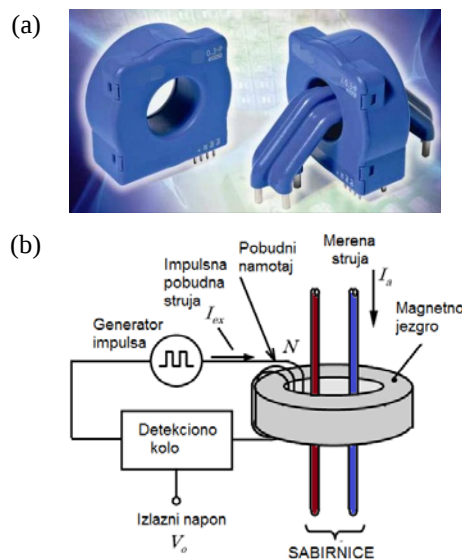
nije navedene granice, pretvarač treba da se isključi i pošalje signal greške u roku od 0.3 s[5-6]:

1. Za invertore nominalne izlazne snage manje ili jednake 30kVA, ova vrednost je 300mA.
2. Za invertore nominalne izlazne snage veće od 30KVA, ova vrednost je 10mA/kVA.

Tri su veoma bitna aspekta, koji karakterišu struju curenja za FN invertorske sisteme. Kao prvo struja curenja je složen sadržaj. Postoje njene DC i AC komponente. Kao drugo, trenutna podvrednost je veoma niska, koja je na nivou miliampera. Kao treće, izuzetno su visoki zahtevi za preciznošću merenja, odnosno potreban je veoma specifičan strujni senzor za detekciju ove struje.

Na Slici 6 je dat izgled i principna šema senzora. Na Slici 6(a) je dat komercijalni izgled senzora, dok je na Slici 6(b) dat principski prikaz. U suštini je to AC/DC senzor struje curenja uzemljenja koji koristi magnetni senzor, koji obezbeđuje visoku osetljivost za detekciju struje širokog opsega. Senzor struje sopstvenim impulsnim pobudnim sistemom se koristiti za detekciju male AC/DC struje od 10mA. Za detekciju struje curenja u ovom slučaju se koriste širina impulsa i frekvencija impulsa. Na ovaj način je postignut široki opseg merenja od 1:1000. Ovaj koncept je realizovan jednostavnom konfiguracijom i niskom cenom senzora, koji predstavlja torusno jezgro zasnovano na tanko slojnom nano kristalnom mekom magnetnom materijalu, pobudnom namotaju i elektronskom kolu za detekciju struje curenja koje na svom izlazu daje napon V_o .

Fotonaponski standard predviđa da se za detekciju fotonaponske struje curenja mora koristiti takozvani tip B, odnosno strujni senzor koji može da meri i naizmeničnu i jednosmernu struju curenja. Upravo je takav senzor prikazan na Slici 6. Senzor struje je instaliran na spoljnom linijskim izlaznim vodovima invertora, tako da detektuje struju curenja (od bilo kojeg linijskog voda ka uzemljenju).



Slika 6. Senzor za detekciju struje curenja invertora; (a) komercijalni izgled i ugradnja, (b) principski prikaz

VI TEHNIKE KONTROLE STRUJE CURENJA

U ovom trenutku je tehnologija suzbijanja i kontrola struje curenja veoma aktuelna tema na nivou naučnih istraživanja ali i praktične implementacije u oblasti fotonaponskih sistema povezanih na elektroenergetsku mrežu.

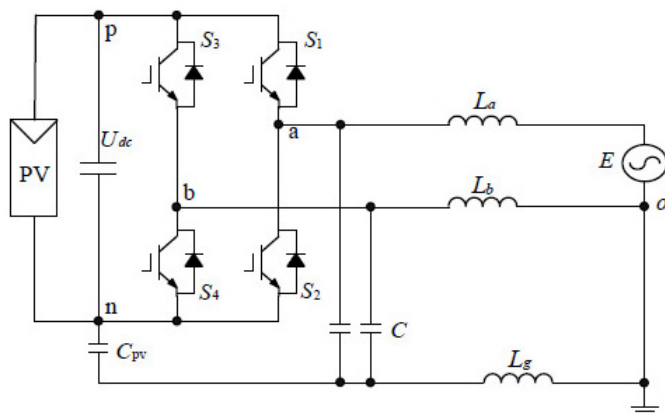
Veličina struje curenja zavisi od parazitne kapacitivnosti C_{PE} između fotonaponskog sistema i zemlje, kao i od brzine promene napona zajedničkog moda (tzv. „comon mode voltage“). Vrednost parazitne kapacitivnosti je takođe povezana sa spoljnim uslovima životne sredine, meteorološkim uslovima, veličinom i strukturom fotonaponskih modula i drugim faktorima. Kao što je prethodno rečeno ova parazitna kapacitivnost može imati specifičnu vrednost po kW instalisane snage u opsegu 50-150nF/kW. Brzina promene napona zajedničkog moda je pre svega određena topologijom i strukturom i modulacionim algoritmom FN invertorskog pretvarača, a zatim i nekim drugim faktorima (mestom i načinom ugradnje, uticajima energetske mreže i sl.) [7].

Što se tiče tradicionalne jednofazne/trofazne fotonaponske invertorske topologije bez transformatora, dva su osnovna uslova za efikasno potiskivanje struja curenja: (1) potrebno je konzistentno dimenzionisati priključne sabirnice H mosta i težiti da njihove parazitne induktivnosti budu što manje, (2) u pogledu upravljanja treba težiti sintezi ne nultih vektora u referentnom vektorskom sistemu, kako bi se održao konstantan napon zajedničkog moda [7].

U nastavku će biti detaljnije izložene monofazne i trofazne topologije koje se koriste u cilju kontrole struje curenja u FN sistemima sa fotonaponskim invertorima.

A) Tehnike kontrole struje curenja monofaznih invertora

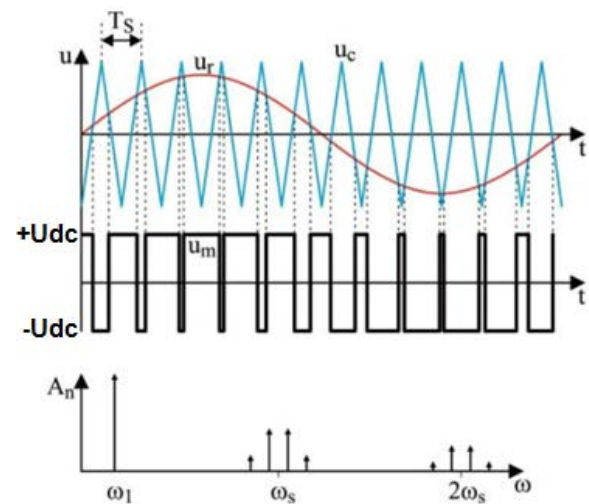
Na Slici 7 je prikazana topologija punog H mosta, tzv. topologija H4. Osnovu topologije čini H-most sa visokofrekventnim prekidačima S1-S4 i pripadajućim povratnim diodama. Na izlazu ka mrežnim priključcima sa koriste prigušnice L_a , L_b , kao i prigušnica u povratnom vodu L_g . Ulazni napon H mosta je U_{dc} .



Slika 7. Kontrola struje curenja u monofaznom H4-mosnom mrežnom invertoru

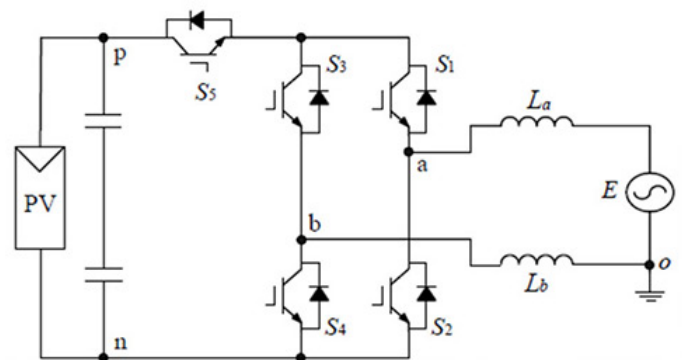
Da bi se rešio problem struje curenja u punom H-mosnom FN invertoru, može se koristiti bipolarna PWM modulacija (modulacija položaja prednje i zadnje ivice impulsa prirodnim

odabiranjem)[7-9]. Karakteristični talasni oblici za ovaj tip modulacije su dati na Slici 8.



Slika 8. Karakteristični talasni oblici monofaznog H mosta i spektar izlaznog napona

Na Slici 8 su prikazane sledeće vrednosti: modulišući signal - U_r , modulacioni nosilac - U_c , perioda odabiranja - T_s , modulisani signal - U_m i spektar izlaznog napona invertora. S obzirom na to da se izlazni napon invertora menja od $+E$ do $-E$ ovakav tip modulacije naziva se bipolarna modulacija. Odnos maksimalnih trenutnih vrednosti modulišućeg signala i nosioca naziva se indeks modulacije. Spektar izlaznog napona invertora se sastoji od osnovnog harmonika niske učestanosti i niza viših harmonika grupisanih oko harmonika čija je učestanost celobrojni umnožak učestanosti odabiranja ω_s . U spektru mogu postojati samo neparni harmonici jer je ispunjen uslov $f(t+T/2) = -f(t)$. Kako je u prikazanom primeru $\omega_s \approx 12 \omega_1$, sledi da ne postoje harmonici na učestanosti $\omega = k\omega_s$, jer bi to bili parni harmonici. Učestanost odabiranja ($\omega_s = 5 \text{ kHz} \dots 20 \text{ kHz}$) i mnogo je veća od učestanosti osnovnog harmonika (obično 50 Hz ili 50 Hz), iz prenosne funkcije sledi da će harmonijska izobličenja napona na opterećenju biti veoma mala.



Slika 9. Kontrola struje curenja u jednofaznom H5-mosnom mrežnom invertoru

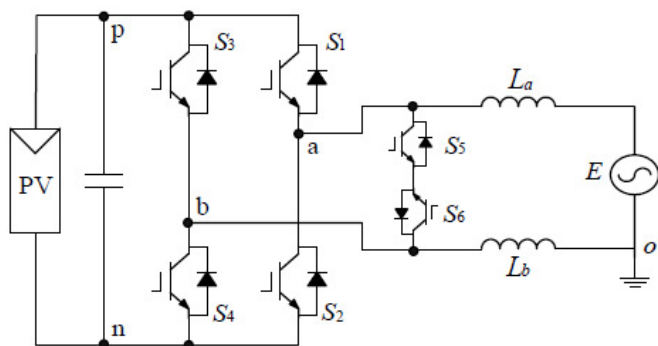
Ova vrsta modulacije eliminiše visokofrekventnu komponentu napona zajedničkog moda na u invertorskom sistemu, tako da napon zajedničkog moda generalno ima samo niskofrekventnu komponentu (pretežno prvog harmonika), čime se smanjuju

efekti struje curenja.

Na Slici 9 je prikazana mosna H5 topologija monofaznog invertora kojom se takođe može postići kontrola struje curenja.

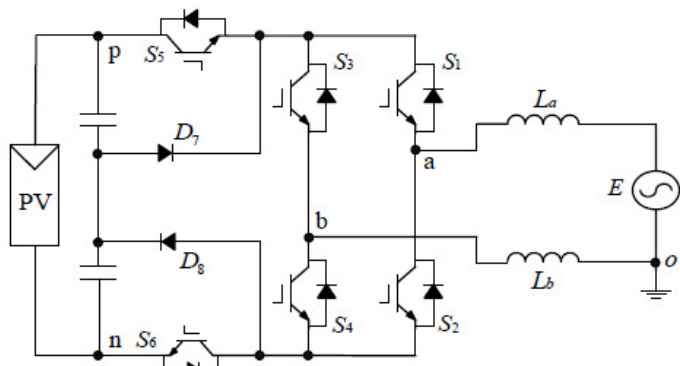
Ova topološka struktura zahteva dodavanje samo jednog dodatnog tranzistorskog prekidača S5 u poređenju sa tipom punog mosta. Ovo je razlog zašto se ova topologija naziva H5 topologija. FN modul se isključuje iz mreže tokom oporavka struje kroz zamajne (povratne) diode, kako bi se sprečilo da napon panela od (+) pola ili (-) pola ka „zemlji“ fluktuiira sa prekidačkom frekvencijom. Ovim se postiže da se napon zajedničkog moda održava skoro konstantnim.

Na Slici 10 je prikazana *HERIC* (eng. *highly efficient and reliable inverter concept*) topologija bazirana na AC prekidaču, odnosno AC bajpasu za kontrolu struje curenja u FN sistemu sa invertorskim pretvaračem [7-8].



Slika 10. Kontrola struje curenja u jednofaznom H-mosnom mrežnom invertoru HERIC topologija

Ova topološka struktura zahteva dodavanje samo jednog dodatnog tranzistorskog para S5 i S6 (jedan prekidački element integrisan u tranzistorskom modulu) kojim se obezbeđuje AC prekidačka funkcija. Ovo je konfiguracija u kojoj su dva anti-paralelna pomoćna prekidača dodata konvencionalnom pretvaraču H-mosta, mogu da provedu povratnu struju najkraćim putem tokom perioda kada je izlazni napon pretvarača H-mosta nula, i mogu smanjiti gubitke i šum (a time i struju curenja).



Slika 11. Kontrola struje curenja preko DC bajpasa

Pretpostavimo da posmatramo jednu polovinu H mosta, odnosno rad prekidača S1 i S4 u mostu HERIC AC bajpas topologije. Tokom pozitivnog polu ciklusa, prekidač S5 je uvek isključen i S6 je uvek uključen, a S1 i S4 su modulirani prekidačkom frekvencijom. Kada su S1 i S4 uključeni, naponi polova su U_{dc} i

0, a napon zajedničkog moda je $U_{dc}/2$. Kada su S1 i S4 isključeni, struja teče kroz anti-paralelnu diodu od S6 i prekidač S5, a konstantni napon je $U_{dc}/2$, dok je napon zajedničkog moda u ovom slučaju jednak $U_{dc}/2$. Slična situacija se ima kada se uključuju i isključuju prekidači S2 i S3.

Na Slici 11 je prikazana H6 invertorska topologija koja je bazirana na DC bajpasu [7]. H6 DC bajpas topologija je bazirana na sledećem principu rada: U pozitivnom polu-ciklusu, prekidači S1 i S4 su uvek uključeni, a S5, S6 i S2, S3 su naizmenično uključeni. Kada su S5 i S6 uključeni, S2 i S3 su isključeni, tada je napon zajedničkog moda $U_{dc}/2$. Kada su S2 i S3 uključeni, a S5 i S6 isključeni, postoje dve trenutne putanje povratne struje: (1) S1, S3 anti-paralelna dioda, (2) S4, S2 anti-paralelna dioda. Dioda D7 i D8 spajaju napon na $U_{dc}/2$, a napon zajedničkog moda je tada $U_{dc}/2$ u ovom trenutku. Napon zajedničkog moda u negativnom polu-ciklusu je takođe $U_{dc}/2$, tako da se struja curenja može na ovaj način veoma efikasno ograničiti ili čak potisnuti.

Sve prethodno navedene topološke strukture smanjuju struju curenja snižavanjem napona zajedničkog moda (tzv. *common mode voltage*). Tehnologija invertora sa više nivoa kao što su sa 3 nivoa ili 5 nivoa, takođe se može koristiti za smanjenje napona zajedničkog moda (pozitivne i negativne tačke ka „zemlji“), čime je moguće smanjiti struju curenja kroz parazitne kapacitivnosti, kao posledicu ovih napona. U nastavku će biti više reči o ovim topologijama sa više nivoa, koje se u principu koriste u trofaznim primenama.

B) Tehnike kontrole struje curenja u trofaznim invertorskim FN sistemima

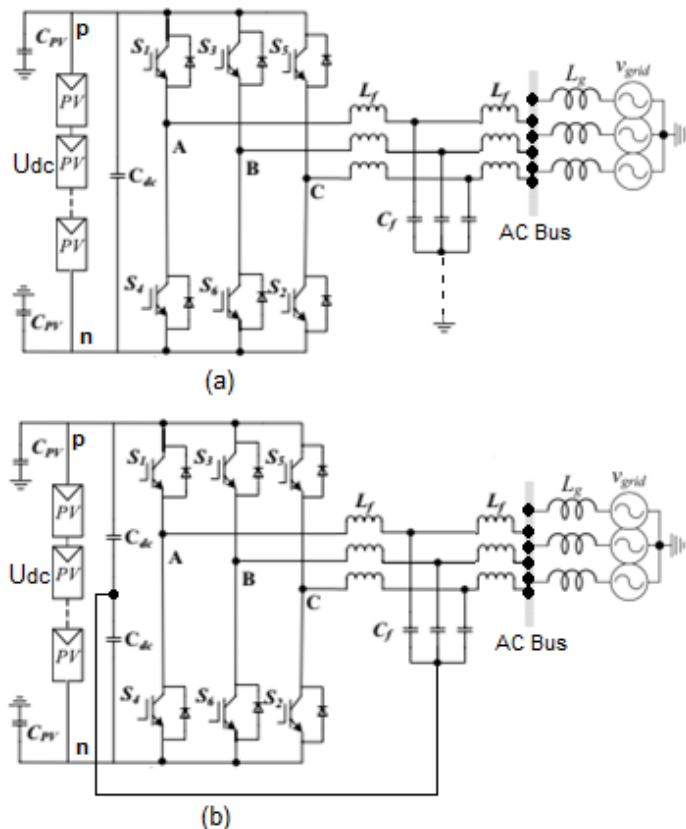
U ovom poglavlju su razmotrene trofazne topologije FN invertora koje omogućavaju ograničenje struja curenja. Na Slici 1 je data klasična invertorska topologija za ovu namenu. Invertor je direktno i bez galvanske izolacije (energetskog transformatora) povezan na elektroenergetsku mrežu.

Tipičan trofazni fotonaponski sistem bez transformatora povezan na mrežu sa korišćenjem induktivno-kapacitivnog LCL filtera je prikazan na Slici 1(a). Generalno je poznato da je LCL filter manjih gabarita i da ima bolje harmonijsko slabljenje nego L filter. Ipak, niska struja curenja ne može biti postignuta sa ovim klasičnim LCL filterom bez odgovarajućih tehnika redukcije struje curenja. S druge strane, upotreba MLCL filtera sa srednjom tačkom, kao što je prikazano na Slici 1(b), je najjednostavnije rešenje za smanjenje struja curenja u trofaznim FN invertorima [10].

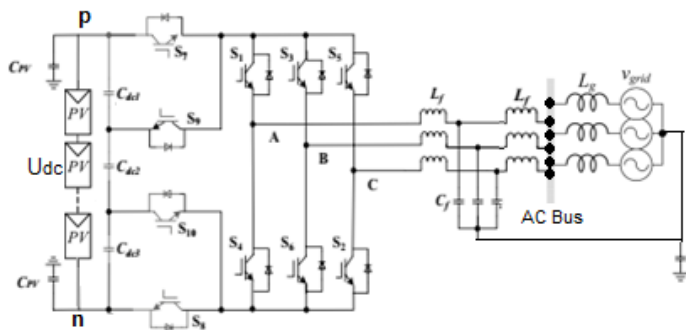
MLCL filter obavlja dva zadatka u sistemu ovog energetskog pretvarača: (1) harmonijsko slabljenje struja u mreži i struje curenja se smanjuje; ima iste komponente kao i klasični LCL filter, osim spajanja filterskih kondenzatora zajedničku tačku (srednju tačku) na DC sabirnicama, kao što pokazuje Slika 1(b). Ova sprega ustvari predstavlja niskopropusni filter, koji prigušuje visokofrekventne komponente napona na parazitnoj kapacitivnosti CPV, smanjujući struju curenja u FN sistemu.

Na Slici 13 je prikazana H10 topologija koja obezbeđuje kontrolu struje curenja preko DC bajpasa. Ona u principskom smislu odgovara monofaznoj H5 topologiji, samo što se u ovom slučaju koristi trofazni invertor umesto monofaznog. Takođe

topologija na Slici 13 se može raspregnuti na tri monofazne topologije, tako da važi isto objašnjenje kao u slučaju H5 topologije. U ovom slučaju treba skrenuti pažnju da se za ograničenje struja curenja koristi LCL filter koji je povezan na neutralnu tačku elektroenergetske mreže. U ovom slučaju umesto tranzistora i diode (kao na Slici 11) u DC bajpasu u svakoj grani se koriste po dva tranzistorska prekidača S9, S7, odnosno S8, S10. U ovom slučaju u DC kolu se koriste tri kondenzatora (dva za svaki bajpas i jedan između) [10-13].

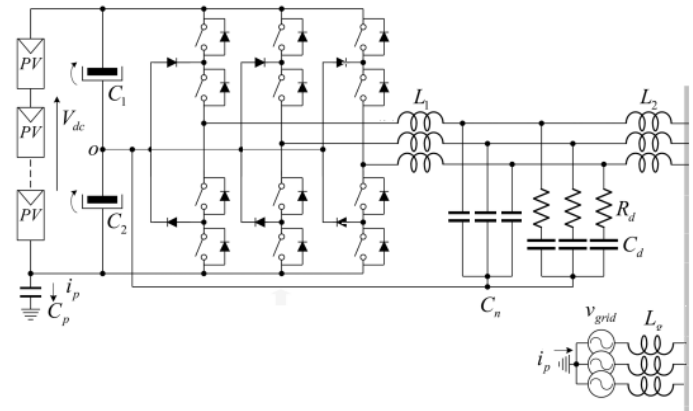


Slika 12. Kontrola struje curenja u trofaznim FN invertorima; (a) sa klasičnim LCL filterom, (b) sa MLCL filterom



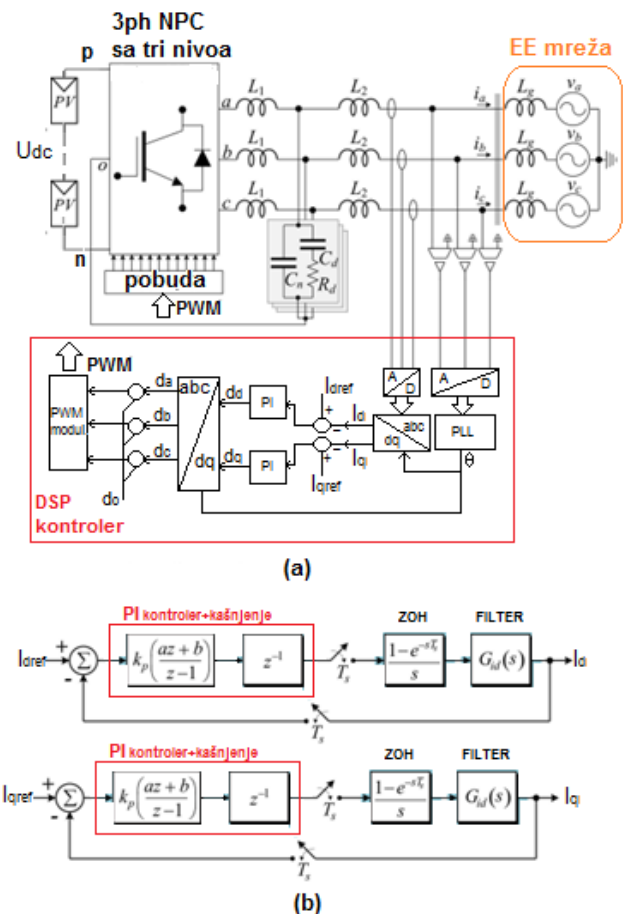
Slika 13. Kontrola struje curenja u trofaznim FN invertorima-H10 topologija

Topologija invertora sa tri nivoa i neutralnom spregnutom tačkom (NPC) je data na Slici 14. NPC topologija generiše linijski napon sa pet nivoa, poboljšavajući kvalitet talasnih oblika napona u harmonijskom smislu [10-14].



Slika 14. Kontrola struje curenja u trofaznom FN invertoru sa tri nivoa priključenim na mrežu preko MLCL filtera sa pasivnim prigušenjem

Štaviše, napon na poluprovodničkim prekidačkim elementima poluprovodnika je jednaka polovini DC napona, što omogućava visoki napon u FN nizu. Kondenzator (C_p) je uključen u DC magistralu na negativnom polu i on predstavlja ustvari parazitnu kapacitivnost FN sistema. Impedansa mreže se smatra čisto induktivnom i predstavljena je induktorom L_g .



Slika 15. Principski prikaz kontrole trofaznog FN invertora sa tri nivoa; (a) blok šema upravljačkog kola u sinhronom referentnom sistemu, (b) ekvivalentna upravljačka šema sa funkcionalnim blokovima

Strategija modulacije FN invertora je ustvari modulacija širine impulsa (PWM) sa prisustvom faznog nosioca, koja predstavlja jednostavnu i laku implementaciju [11-14]. Koristi se uobičajeni signal za proširenje indeksa modulacije NPC pretvarača i za DC balans napona kondenzatora magistrale (C1 i C2). Pasivni filter sa malim gubicima prigušenje se koristi za smanjenje rezonantnog vrha MLCL filtera u cilju izbegavanja nestabilnosti sistema upravljanja. Ova koncepcija sa prigušenjem zadržava visokofrekventno slabljenje filtera čak i povećanjem otpornosti prigušenja R_d . Štaviše, efekat prigušenja se povećava, kako se gubici snage povećavaju sa odnosom C_d/C_n . Detaljna analiza rada ove invertorske topologije je data u istraživanju [11-14].

Na Slici 15 je data principska šema kontrole trofaznog invertora sa tri nivoa sa NPC kojom se obezbeđuje smanjenje struja curenja. U principu analiza stabilnosti zavisi od korišćene tehnike kontrole. Na ovaj način je usvojena digitalna proporcionalno-integralna (PI) kontrola u sinhronom referentnom sistemu (d-q) za kontrolu mrežne struje, kao što je ilustrovano na Slici 4(a). Kontrolni sistem prikazan na slici 4b važi za obe ose (d i q). Jedinično kašnjenje z^{-1} je uključeno zbog digitalne implementacije, gde je T_s period semplanja. Štaviše, zadržavanje nultog reda (ZOH) modelira FNM dinamiku. Efekat d-q transformacije nije uzet u obzir na Slici 4(b) pošto je prekidačka učestanost dovoljno veća od osnovne učestanosti 50Hz. Diskretni model filtera se može dobiti iz Z transformacije, uzimajući u obzir ZOH model i usvajajući da je učestanost semplanja (odabiranja) dvostruko veća od prekidačke učestanosti. Dizajn PI kontrolera bi se mogao napraviti s obzirom na izlazni filter kao čisto induktivni filter ($L1 + L2$), pošto se filterski kondenzator C_f može zanemariti za frekvencije niže od rezonantnog pika.

Takođe se za ovu topologiju pokazalo da induktivnost mreže utiče na ponašanje i struje curenja i stabilnost sistema, ograničavajući opseg primene za filtersku otpornost. Pristup se takođe može proširiti na druge topologije FN invertora bez transformatora i šeme za smanjenje struje curenja koje koriste MLCL filter.

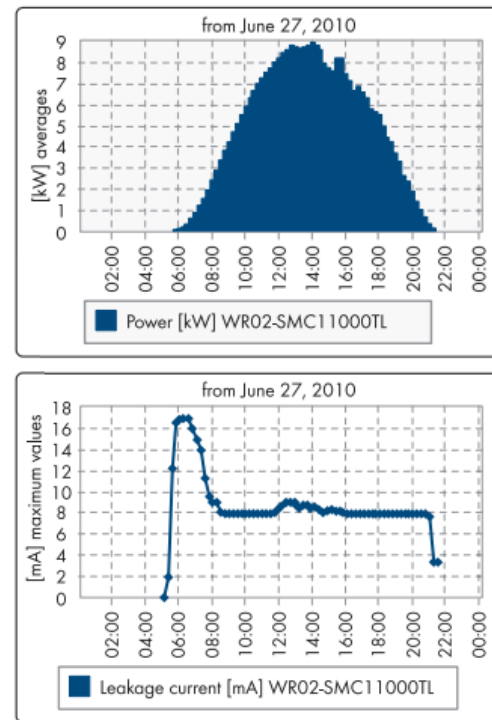
VII EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Kao što je prethodno rečeno, treba izbegavati velike struje curenja kako bi se sprečilo lažno okidanje zaštitnog uređaja od diferencijalne struje (ZUDS) u sistemu. Pošto je struja curenja direktno zavisna od kapacitivnosti FN modula prema zemlji, za svaki naizmenični napon prema zemlji može se odrediti granica kapaciteta iznad koje će biti rad podložan smetnjama. Granica kapacitivnosti se može izračunati iz relacije (2) i nakon toga proveriti sa kataloškim podacima za FN invertor.

U ovom poglavlju će biti prikazani neki karakteristični rezultati koji se tiču kontrole i ograničenja struje curenja u FN invertorskom sistemima iz prakse. Sveobuhvatno testiranje firme SMA sprovedeno na terenu otkrilo je da su vrednosti izračunate korišćenjem granice kapacitivnosti vršne vrednosti za većinu FN modula staklo-staklo, a do njih se dolazi samo po jakoj kiši. Vrednosti struje curenja su povišene ako postoji jutarnja kondenzacija, ali treba napomenuti da njene vrednosti padaju na prihvatljive nivoe tokom perioda najvećeg prinosa solarnog sistema, odnosno proizvodnje na DC strani (kada je sunčevo

zračenje intenzivno). U nastavku će biti prikazane reakcije struje curenja za pomenute slučajeve [1-2].

Na Slici 16 je prikazan dnevni snimak proizvedene snage i struje curenja na FN sistemu snage 10 kW za vreme jednog tipičnog letnjeg dana.



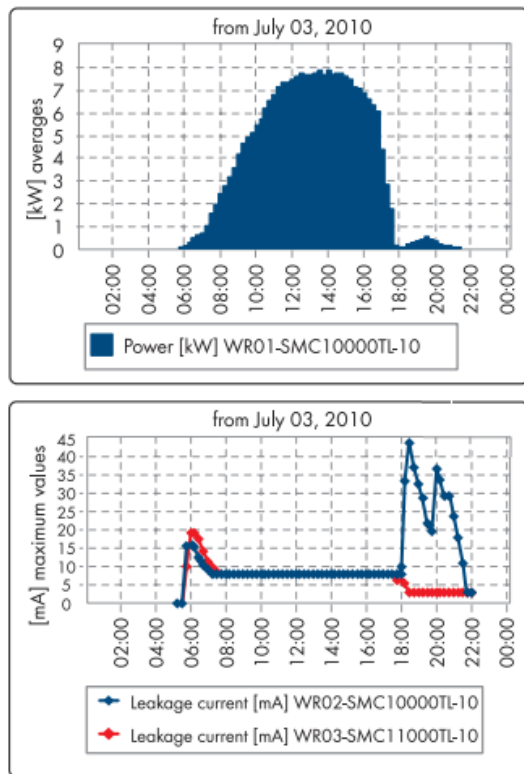
Slika 16. Snimak ulazne DC snage i struje curenja na FN sistemu snage 10 kW- uticaj jutarnje kondenzacije na FN panelima [1]

Uočava se da je u ranim jutarnjim satima kada je dominantna kondenzacija usled jutarnje rose na FN panelima dominantan uticaj struje curenja. Snimak je dat za primenjeni monofazni solarni invertor firme SMA tip SMC-1100TL, ulazne DC snage 10,8 kW i izlazne snage 10 kW i maksimalne vrednosti izlaznog napona 240 Vac. Uočava vršna vrednost struje curenja od 17 mA u jutarnjim satima, dok je u toku dana ustaljena vrednost ove struje ispod 10 mA.

Na Slici 17 je dat snimak istih veličina tokom tipičnog sparnog dana u mesecu julu, ali je akcenat u prikazu dat na trenutak kada se u popodnevnom satima usled oblačnosti javio intenzivan pljusak, odnosno obilna padavina, kada su FN paneli bili pod intenzivnim dejstvom kiše. U ovom slučaju, kao što se sa snimka na Slici 17 može zaključiti, se imala značajno veća vrednost struje curenja u tom trenutku u odnosu na jutarnju (od oko 20 mA) i da je ona iznosila oko 45 mA u trajanju od približno 2 h. Na istom snimku se uočava je kod invertora tipa WR03-SMC 11000 TL ova struja redukovana u odnosu na invertore SMS 10000TL, kao i da je smanjena na prihvatljivi nivo od par miliampera.

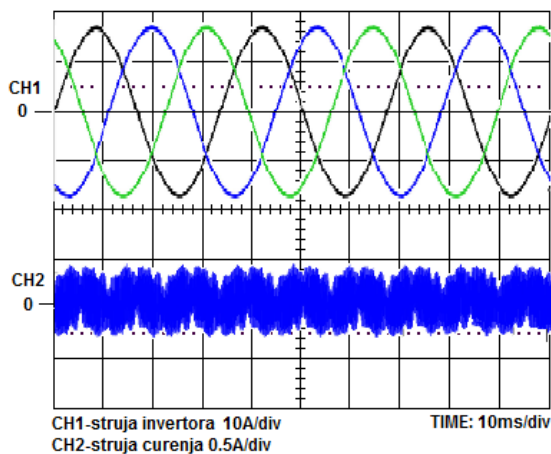
U nastavku su dati osciloskopski snimci koji se odnose na merenje struje curenja u trofaznom NPC FN invertoru sa tri nivoa priključenim na mrežu preko MLCL filtera sa pasivnoj prigušnoj otpornosti (topologija na Slici 14). U ovom slučaju

parazitna kapacitivnost FN panela („n“ priključka) prema zemlji je iznosila $\approx 1\mu\text{F}$.



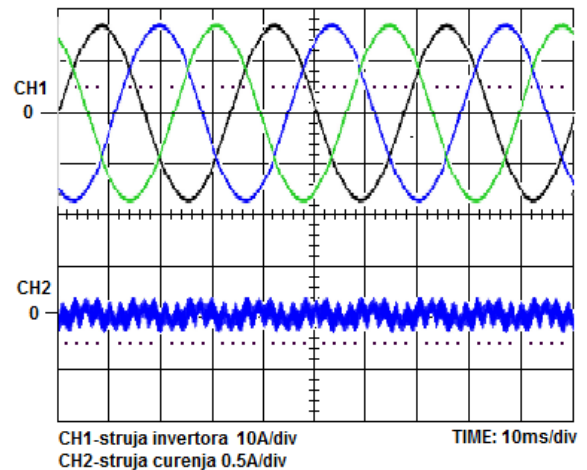
Slika 17. Snimak ulazne DC snage i struja curenja na FN sistemu snage 10 kW - uticaj popodnevne intenzivne kiše na FN panelima; za dva tipa invertora SMC1000TL i SMC11000TL [1]

Na Slici 18 je su prikazani talasni oblici izlaznih struja invertora (kanal CH1) i talasni oblik trenutne vrednosti struje curenja (kanal CH2) za slučaj prigušne otpornosti od 8Ω . Uočava se da je „peak-peak“ amplituda struje curenja približno jednaka 0,9 A. Trenutna vrednost amplitude struje curenja je 0,45 A, dok je efektivna vrednost struje curenja 0,32 A. Ova vrednost je iznad dozvoljenog limita.



Slika 18. Snimak izlaznih struja trofaznog NPC invertora sa tri nivoa i struje curenja za slučaj otpornosti od 10Ω u MLCL filtru sa pasivnim omskim prigušenjem

Na Slici 19 je prikazan slučaj kada je vrednost prigušne otpornosti iznosila 1Ω . U ovom slučaju je „peak-peak“ amplituda struje curenja približno bila jednaka 0.5A. Trenutna vrednost amplitude struje curenja je 0.25A, dok je efektivna vrednost struje curenja iznosila 0.15A. Treba napomenuti da je ova vrednost ispod dozvoljenog limita i da je u skladu sa propisima.



Slika 19. Snimak izlaznih struja trofaznog NPC invertora sa tri nivoa i struje curenja za slučaj otpornosti od 1Ω u MLCL filtru sa pasivnim omskim prigušenjem

VIII ZAKLJUČAK

U radu je istaknut problem struja curenja i rezidualnih struja koje se najčešće susreću u FN sistemima (obično na većim FN elektranama). U nastavku je data analiza sistema FN inverter-mreža, kao i analiza struja curenja u ovom sistemu. U radu su takođe analizirane topologije monofaznih i trofaznih FN invertora koje obezbeđuju ograničenja i kontrolu struje curenja. Akcenat je dat na mosne topologije (monofazne i trofazne) i na trofaznu topologiju NPC invertora sa tri nivoa u kombinaciji sa pasivnim LCL i MLCL filtrima i sa prigušnom otpornošću. Na kraju su predstavljani neki praktični eksperimentalni rezultati koji se odnose na problematiku struja curenja monofaznih FN invertora i trofaznih NPC FN invertora koji su povezani na elektroenergetsku mrežu.

Izložena problematika bi mogla imati značaj za projektante i to prvenstveno u slučajevima kada je potrebno izvršiti izbor uređaja za zaštitu od diferencijalne struje, propisani u uslovima koje propisuju nadležne EDB. Sa druge strane, pogrešan odabir zaštite može da utiče na ispadanje invertora iz rada, čak i kada ne postoji curenje struje u instalaciji, u normalnim okolnostima. Stoga je problem paraziten kapacitivnosti koje se imaju između FN panela i „zemlje“ veoma značajan kod prorade uređaja za zaštitu od diferencijalne struje u slučajevima kada postoji kondenzacija (jutarnji period), a posebno pri kišovitim i intenzivno kišovitim vremenskim uslovima.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje u ovom radu je delom podržano od strane Ministarstva Nauke, Tehnološkog razvoja i Inovacija Republike

Srbije u okviru krovnog projekta pod Ugovorom br. 451-03-66/2024-03/200034, a delom kroz komercijalne i razvojne projekte firme Conseko d.o.o iz Beograda u oblasti solarne energetike.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] *Leading Leakage Currents*, Information on the design of transformerless inverters of type Sunny Boy, Sunny Tripower, Sunny High power, SMA Leakage current-TI-en-26, Version 2.6, 2016, <http://www.sma-solar.com/> [pristupljeno 5.02.2024]
- [2] *Criteria for Selecting a Residual-Current Device Use of Residual-Current Devices for SUNNY BOY, SUNNY MINI CENTRAL and SUNNY TRIPOWER*, RCD-TI-en-43, Version 4.3, 2016, <http://www.sma-solar.com/> [pristupljeno 5.02.2024]
- [3] Shaolin, Y., Wang, J., Zhang, X., Fei, L. Complete parasitic capacitance model of photovoltaic panel considering the rain water, Chinese Journal of Electrical Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 77-84, 2017. <https://doi.org/10.23919/CJEE.2017.8250427>
- [4] *Module Technology, SMA inverters provide the optimum solution for every module*, Duennschicht-TI-UEN114630, Version 3.0, 2016., <http://www.sma-solar.com/> [pristupljeno 5.02.2024]
- [5] NB/T 32004-2018: Technical specification of FN grid-connected inverter, 2018. <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/NBT32004-2018> [pristupljeno 10.02.2024]
- [6] IEC62109-2:2011, Safety of power converters for use in photovoltaic power systems - Part 2: Particular requirements for inverters, <https://webstore.iec.ch/en/publication/6471> [pristupljeno 10.02.2024]
- [7] Kerekes, T. *Analysis and Modeling of Transformerless Photovoltaic Inverter Systems*, Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet, Danmark, 2009.
- [8] Behera, S., Behera, M. K., Majhi, H., Akram, F. Study of PWM control techniques for single phase inverter with variable DC input, in Proc. 2nd International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, pp. 811-816, 14-15 June 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8663144>
- [9] Estévez-Bén, A.A., Alvarez-Diazcomas, A., Macias-Bobadilla, G., Rodríguez-Reséndiz, J. Leakage current reduction in single-phase grid-connected inverters-a review, Applied Science, Vol. 10, No. 7, pp. 2384, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10072384>
- [10] Ma, H., Lan, Z., Chen, Z. Non-isolated H10 three phase inverter for leakage current suppression, Journal of Power Electronics, Vol. 20, pp. 1139-1148, 2020. <https://doi.org/10.1007/s43236-020-00121-8>
- [11] Giacomini, J.C., Michels, L., Pinheiro, H., Rech, C. Design methodology of a passive damped modified LCL filter for leakage current reduction in grid-connected transformerless three-phase FN inverters, IET Renewable Power Generation, Vol. 11, No. 14 pp. 1769-1777, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0256>
- [12] Dong, S., Lian, J., Yang, J. The leakage current suppression of transformerless threelevel photovoltaic grid-connected inverter, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2479, pp. 012034, 2023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2479/1/012034>
- [13] Jiang, L., Chen, Y., Dai, F., Liu, K., Chen, X., He, X. A nine-switch inverter with reduced leakage current for FN grid-tied systems using model-free predictive current control, In Proc. 3rd International Conference on Power and Electrical Engineering (ICPEE 2022), Singapore, pp. 396-405, 29-31 December 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.170>
- [14] Keramatzadeh, A., Kosarian, A., Ghodrattollah, S.S. Reduction of leakage current in grid connected three-phase FN inverters, Journal of Basic and Applied Scientific Research, Vol. 3, No. 7, pp. 439-446, 2013.

AUTORI/AUTHORS

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

dr Miodrag Vuković, dipl.inž., Conseko d.o.o, Beograd, m.vukovic@conseko.rs, ORCID [0000-0003-0158-192X](https://orcid.org/0000-0003-0158-192X)

Detection and Control of Leakage Current of PV Inverters

Abstract – The leakage current in photovoltaic (PV) systems, which is also known as residual current is a consequence of the parasitic capacitance between the PV and the ground (free-field PV plants) or the PV system and the structure of the object that is grounded (roof-top PV plants). When the PV system-power grid parasitic capacitance forms a loop, the common mode voltage will produce a common mode current across the parasitic capacitance. The motivation for writing this short study came from practice where the authors faced the mentioned problem on a specific PV power plant with an output power of 500kW. Therefore, the main topic of the paper will be the topologies of PV inverters and their additional impact on the residual current, as well as ways of its detection. An overview of the relevant standards in this field and some possible techniques for controlling leakage currents in FN systems with solar inverters will also be given.

Index Terms – PV plants, Parasitic capacitance, Residual current, FN inverter, Differential protection

Primena veštačkih neuronskih mreža za predikciju snage na izlazu hidroelektrane

Stefan Čubonović*, Aleksandar Ranković*, Marko Krstić**

* Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerziteta u Kragujevcu

** Javno preduzeće Elektroprivreda Srbije

Rezime - U ovom istraživačkom radu sprovedena je analiza dva tipa veštačkih neuronskih mreža (*Artificial Neural Network* – ANN) za predikciju snage na izlazu hidroelektrane (HE). Prvi tip je veštačka neuronska mreža sa jednosmernim prostiranjem signala (*Feedforward Artificial Neural Networks* – FF-ANN), dok je drugi tip rekurentna neuronska mreža (*Recurrent Neural Network* – RNN). Detaljno su analizirani koraci koji su preduzeti u procesu implementacije neuronskih mreža za ovu svrhu, od prikupljanja i pripreme podataka do treniranja, evaluacije i analize rezultata. Kao ulazni podaci korišćeni su neto pad, protok vode kroz turbinu, kota gornje vode, kota donje vode i temperatura ulazne rashladne vode. Na osnovu koeficijenta korelacije pojedinih veličina iz ulaznog sloja sa izlaznom snagom izvršena implementacija novih ANN. Rezultati dobijeni ovim varijacijama su sistematski analizirani kako bi se postiglo što preciznije modelovanje, sa akcentom na dinamičke promene u protoku vode kroz turbinu.

Cljučne reči - veštačka neuronska mreža; FF-ANN; RNN; hidroelektrana; izlazna snaga

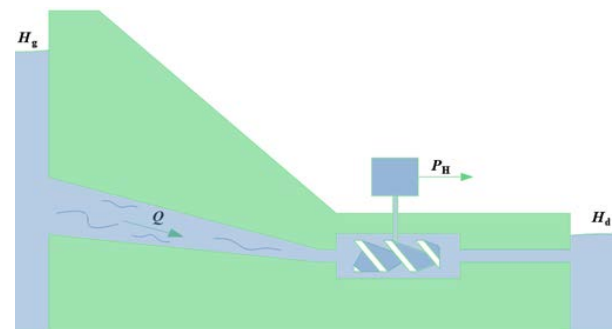
I UVOD

Uzimajući u obzir imperativ održive ravnoteže i neodložne potrebe za „zelenom“ i pouzdanom energijom, HE zadržavaju ključnu poziciju u svetskom energetskom okruženju. Ovim se njihova značajnost ne ograničava samo na generisanje električne energije, već pruža i osnovu za prelazak ka održivijoj budućnosti u oblasti energetike.

HE koriste potencijal akumulirane energije vode za generisanje električne energije. Kada su u pitanju protočne HE (Slika 1), one koriste kinetičku energiju neprekidnog toka vode, pretvarajući je u mehaničku rotacionu energiju na lopaticama turbina koja se potom pretvara u električnu energiju posredstvom generatora (proces konverzije). Snaga ovih HE zavisi od protoka vode, a za pokretanje generatora koriste se najčešće Kaplanove i Fransisove turbine. Iako suočene sa varijabilnim protokom, protočne HE imaju ključnu ulogu u održavanju fleksibilnosti EES-a. Istraživanje u ovom radu sprovedeno je sa realnim podacima jedne protočne HE čiji detaljni podaci, uključujući naziv, lokaciju i tehničke specifikacije nisu navedeni zbog poštovanja tajnosti podataka. Prethodno pomenuto neće uticati na analizu ANN, što je u fokusu ovog rada.

Primena ANN kao izuzetnog alata za analitičko istraživanje i prediktivno modelovanje se sve više koristi za analizu složenih sistema. Kroz sposobnost da oponašaju interakcije između

neurona u ljudskom mozgu, ove mreže pružaju sposobnost otkrivanja dubokih uzoraka u podacima i izvođenja kompleksnih predviđanja učeći složene i nelinearne veze između različitih ulaznih podataka čak i ako na prvi pogled ti podaci ne deluju povezano [1], kao što je slučaj sa pojedinim veličinama u posmatranom primeru. S obzirom na njihovu sposobnost adaptacije i učenja iz iskustva, ANN postaju vredan resurs u prevazilaženju izazova vezanih za energetiku, posebno u procesu estimacije stanja, u pseudo merenjima [2], kao na primer predikcija izlazne snage HE na osnovu podataka koji ne moraju ključno imati direktan uticaj na istu. Uvođenje ovog inteligentnog alata pomera granice tradicionalnog analitičkog pristupa i ima potencijal za stvaranje pouzdanog i efikasnog rešenja u domenu energetike.



Slika 1. Tipični prikaz protočne hidroelektrane

Predikcija snage HE pomoću ANN je ideja koju su istraživači u radu [3] već razvili. Međutim, u poređenju sa tim radom, autori ovog rada primenili su dodatni model ANN za predikciju snage – RNN. Zatim, ulazne veličine u radu [3] su direktno zavisne od izlazne snage i na osnovu njih se izlazna snaga može odrediti i analitičkim putem, dok je doprinos ovog rada predviđanje izlazne snage na osnovu veličina koje nisu direktno povezane sa njom, poput temperature ulazne rashladne vode. Dodatno, analizom rezultata u ovom radu pokazano je koji od dva modela daje veću tačnost u različitim uslovima rada, na osnovu toga dat je predlog optimalnog modela ANN za buduće istraživanje.

U cilju traganja za sve efikasnijim načinima optimizacije HE i estimacije stanja EES-a, u ovom radu je razvijen jednostavan i precizan model za predikciju izlazne snage HE zasnovan na primeni ANN, sa podacima koji se mogu dobiti iz SCADA sistema svake HE. U II poglavlju detaljno su opisani modeli neuronskih mreža koji su primenjeni u ovom radu, pokazane su njihove specifičnosti i međusobne razlike. U III poglavlju predstavljen je detaljan opis prikupljanja i analize

karakterističnih veličina i dat je izraz za proračun izlazne snage koji je osnov za razvoj našeg modela. U narednom, IV, poglavlju dat je pregled metrika evaluacije i jedne metrike bitne za analizu u poglavlju VI. Ključni deo prikazan je u V poglavlju istraživačkog rada, gde je različitim, prethodno pomenutim, metrikama evaluacije potvrđena tačnost proračuna, sa osvrtom na implementaciju i arhitekturu primenjenih ANN u softverskom alatu MATLAB. U sledećem, poglavlju VI, izostavljanjem pojedinih karakterističnih veličina u ulaznom sloju, urađena je dodatna analiza značajnosti ulaznih promenljivih, posebno protoka, na performanse razvijenih modela. U poglavlju VII su dati glavni zaključci do kojih se došlo u ovom radu.

II IMPLEMENTACIJA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA KROZ MATLAB

U opštem slučaju postoje tri vrste slojeva kod ANN-a [4]:

1. ulazni sloj (*Input Layer*),
2. skriveni sloj (*Hidden Layer*),
3. izlazni sloj (*Output Layer*).

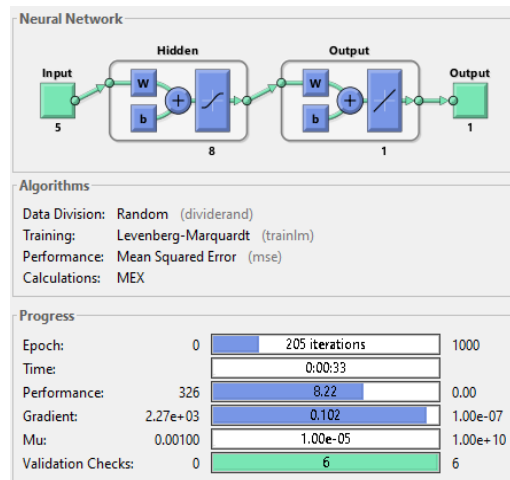
Ulazni sloj predstavlja prvi deo mreže i ima ulogu prihvatanja ulaznih podataka. Svaki neuron u ovom sloju predstavlja jednu od ulaznih veličina koje se koriste za obuku ili testiranje mreže. Dakle, broj neurona u ulaznom sloju direktno zavisi od veličina koje se koriste kao ulazni podaci. Važno je napomenuti da ulazne veličine često zahtevaju normalizaciju ili standardizaciju pre nego što se prenesu mreži kako bi se osigurala stabilnost i konvergencija prilikom obuke, neki softverski alati u funkcijama za pozivanje ANN već imaju deo koji normalizuje podatke. Na primer, u MATLAB-u, funkcija *feedforwardnet* automatski uključuje normalizaciju podataka koristeći podrazumevanu funkciju *mapminmax*. Ovo je posebno bitno kada se koriste različiti tipovi podataka ili kada su vrednosti veličina na različitim skalama.

Broj slojeva, kao i broj neurona u skrivenim slojevima, predstavlja ključne parametre koji oblikuju tačnost i preciznost mreže [5]. Odabir optimalnih vrednosti za ove parametre predstavlja kritičan deo dizajna same mreže i zavisi prvenstveno od prirode problema koji se rešava, kao i od karakteristika i veličine dostupnog skupa podataka. Na primer, dodavanje više neurona u skrivenom sloju omogućava mreži da uči složenije odnose između podataka, što je naročito važno kod nelinearnih problema. Međutim, treba voditi računa da prevelik broj neurona u skrivenom sloju ima suprotan efekat (*Overfitting*) na tačnost ANN [6] jer se u tom slučaju javlja pre-trening (*Overtraining*) ANN [7]. Dakle, za odabir optimalnog broja neurona u skrivenom sloju preporučuje se iterativno testiranje koje će rezultirati što tačnijem modelu.

Izlazni sloj ANN predstavlja krajnji deo mreže i generiše konačne rezultate ili odgovore mreže na osnovu obrade ulaznih veličina. Broj neurona u izlaznom sloju zavisi od tipa problema koji se rešava, u slučaju predikcije snage na izlazu HE dovoljan je jedan izlazni neuron - izlazna snaga.

Prvi korak u implementaciji ANN kroz MATLAB je pažljiv odabir ulaznih i izlaznih veličina, priprema i učitavanje tih veličina i na kraju njihova obrada. Ovaj korak takođe podrazumeva podelu podataka na skupove za trening (60 % ukupnih podataka), validaciju i testiranje (40 % ukupnih

podataka). U drugom koraku, potrebno je definisati arhitekturu ANN, birajući broj slojeva i neurona u svakom sloju. Treći korak je treniranje, koje se sprovodi koristeći funkciju za obuku, gde se prate metrike performansi (Slika 2), radi prikaza data je slika samo jednog tipa mreže. Na kraju se evaluiraju performanse mreže na nezavisnom skupu za testiranje i vrši se optimizacija radi postizanja boljih rezultata.



Slika 2. Praćenje metrike performansi FF-ANN u MATLAB-u tokom procesa treniranja

U ovom radu analiziraćemo dva tipa ANN i oba modela u svojoj implementaciji sadrže prethodna četiri koraka, uključujući evaluaciju. Međutim, već u drugom koraku način rada može biti različit u zavisnosti od primenjenog modela, čije će specifičnosti biti prikazane u nastavku.

Prvi model je veštačka neuronska mreža sa jednosmernim prostiranjem signala - FF-ANN. Usled inherentne prirode problema u ovom istraživanju, preporučuje se primena FF-ANN kao, pretpostavljenog, najadekvatnijeg tipa ANN za rešavanje pomenutog izazova, što ćemo u poglavlju V dodatno analizirati. Glavna karakteristika mreža ovog tipa jeste da zavisnost između podataka nije ciklična. Naime, signali na izlazu isključivo zavise od signala na ulazu, a ne od prethodne vrednosti izlaza – nemaju povratnu petlju, smer signala je unapred od ulaza ka izlazu [4].

Signal na izlazu FF-ANN (y_j) se dobija kao rezultat sledeće aktivacione formule [8]:

$$y_j = f \left(\sum_{i=1}^n (w_{ij} x_i + \theta_j) \right), \quad (1)$$

gde su:

y_j - izlazna veličina (*output variable*),

j - broj neurona u skrivenom sloju,

i - indeks ulazne veličine,

n - broj neurona u prethodnom sloju,

w_{ij} - težinski faktori između veličine i i j (*weight values*),

x_i - ulazna veličina i -tog neurona (*input variables*),

θ_j - vrednost pragova (nagiba) aktivacione funkcije veličine j (*bias*).

Grafički prikaz arhitekture primenjene FF-ANN dat je na Slici 3 a).

Drugi tip modela primenjen u ovom radu je rekurentna neuronska mreža - RNN. RNN ima povratnu petlju koja omogućava pamćenje prethodnih stanja. U ovim mrežama postoji povratna veza koja omogućava informacijama da kruže unazad kroz neuronsku mrežu, što znači da se prethodno izračunata izlazna veličina koristi kao jedna od ulaznih veličina za sledeći korak u treniranju i testiranju neuronske mreže. Problem kod ovih mreža može se javiti kada se informacija prenosi kroz mnogo vremenskih koraka, zbog čega dolazi do problema nestajućeg i eksplodirajućeg gradijenta [9]. Matematički model za izlazni signal u trenutku t iz RNN prikazan je sledećom jednačinom [6]:

$$y_j^t = f \left(\sum_{i=1}^n (w_{ij} x_i^t + u_{ij} y_j^{t-1} + \theta_j) \right), \quad (2)$$

gde su:

y_j^t - izlazna veličina u trenutku t (output variable),

t - trenutni vremenski korak,

j - broj neurona u skrivenom sloju,

i - indeks ulazne veličine,

n - broj neurona u prethodnom sloju,

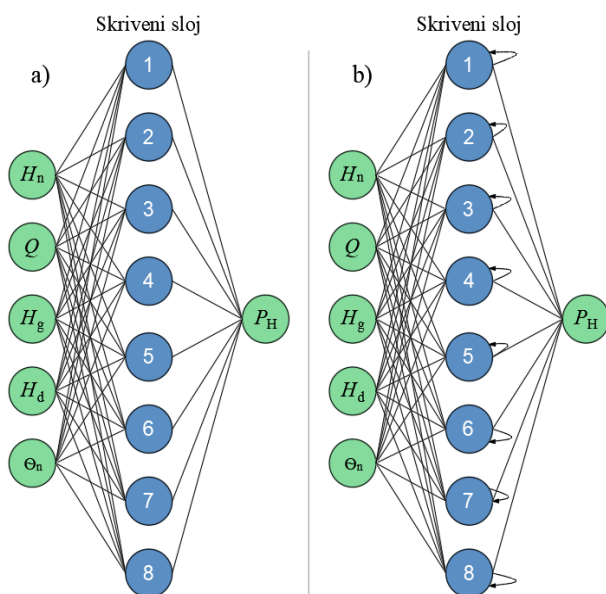
w_{ij} - težinski faktori između veličine i i j (weight values),

x_i^t - ulazna veličina i -tog neurona u trenutku t (input variables),

u_{ij} - težinski faktori između veličite i i j u prethodnom vremenskom koraku ($t-1$),

y_j^{t-1} - izlazna veličina u koraku ($t-1$),

θ_j - vrednost pragova (nagiba) aktivacione funkcije (bias) j -tog neurona.



Slika 3. Ilustracija arhitekture primenjenih ANN
a) FF-ANN, b) RNN

U ovom modelu ulazne veličine x_i^t i izlazna veličina u trenutku ($t-1$) y_j^{t-1} doprinose izlazu y_j^t . Bitno je napomenuti da RNN ima sposobnost očuvanja informacija o prethodnim vremenskim koracima, što ga čini pogodnim za rad sa sekvencijalnim podacima.

Grafički prikaz arhitekture primenjene RNN dat je na Slici 3 b).

III PRIKUPLJANJE I PRIPREMA PODATAKA

Ulazni i izlazni sloj su ključni za modelovanje i analizu sistema primenom ANN. Ovi slojevi čine određene veličine koje se mogu dobiti iz različitih izvora, najčešće su to merenja sa senzora na samoj HE ili meteoroloških stanica. Veličine u ulaznom sloju se koriste za treniranje neuronske mreže i čine osnovu za njen rad. Za kreiranje i testiranje ANN-a u ovom radu korišćeno je više desetina hiljada podataka iz aprila 2023. godine. Podaci predstavljaju skup sledećih veličina za dati vremenski period sa vremenskom diskretizacijom od jednog minuta:

1. statički pad - H_s [m],
2. protok vode kroz jednu turbinu - Q [m³/s],
3. kota gornje vode - H_g [m],
4. kota donje vode - H_d [m],
5. temperatura ulazne rashladne vode - θ_{rv} [°C].

Tabela 1. Ulazni i izlazni podaci neophodni za kreiranje ANN

Vremenski trenutak	H_s [m]	Q $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	H_g [m]	H_d [m]	θ_{rv} [°C]	P_H [MW]
1. 4. 2023.						
00.00.01	20,45	4·84	156,34	135,83	9,79	59,79
00.00.02	20,45	4·84	156,33	135,83	9,79	60,17
⋮						
30. 4. 2023.						
00.58.00	19,77	4·175,96	157,11	137,16	10,74	123,09
00.59.00	19,77	4·175,96	157,11	137,13	10,74	123,02

Od prethodno pomenutih veličina, jedino su međusobno zavisne statički pad, kota gornje vode i kota donje vode. Između ovih veličina važi sledeća relacija [10]:

$$H_s = H_g - H_d \quad (3)$$

Snaga izvučena iz kinetičke energije vodenog toka je u skladu sa jednačinom (4) [11]:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n \quad (4)$$

gde su:

- P_H - snaga na izlazu HE [W],
- η - stepen iskorišćenja procesa konverzije,
- ρ - gustina vode, najčešće se usvaja 1000 kg/m³,
- g - gravitaciono ubrzanje, 9,81m/s²,
- Q - protok vode kroz turbinu [m³/s],
- H_n - neto pad [m].

IV METRIKE ZA EVALUACIJU I ANALIZU REZULTATA

U kontekstu ANN, evaluacija se odnosi na procenu ponašanja modela sa nepoznatim ulaznim podacima [11,12], tj. koliko dobro model generalizuje naučene obrasce na novim ulaznim podacima. To se može postići upotrebom različitih metrika za procenu, kao što su srednja apsolutna greška (*Mean Absolute Error* - MAE), srednja kvadratna greška (*Root Mean Squared Error* - RMSE), koeficijent determinacije (R^2) i druge relevantne metrike za specifični problem.

Prva metrika koja je primenjena za evaluaciju rezultata jeste proračun MAE. Ova greška izračunava se pomoću formule (5) i predstavlja prosečnu apsolutnu razliku između stvarnih i predviđenih vrednosti. Rezultat ove greške je u istoj jedinici kao originalni podaci. Dakle, ako je izlazna snaga izražena u [MW], MAE će biti izražena u [MW].

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_{Hi} - P_{ANNi}| \quad (5)$$

gde su:

- N - ukupan broj merenja,
- P_{Hi} - tačna vrednost dobijena iz HE [MW],
- P_{ANNi} - predviđena vrednost dobijena primenom ANN [MW].

Ova metrika je važna prilikom validacije modela jer pruža jasno merilo tačnosti. Veća vrednost ove greške ukazuje na nisku tačnost u merenju, dok niža vrednost ukazuje na visoku tačnost kreiranog modela.

Druga metrika merodavna za evaluaciju kreiranog modela je RMSE, računa se pomoću formule (6). Da bi se olakšala diskusija o tačnosti kreiranog modela ovu grešku ćemo u poglavlju V prikazati u procentima.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{Hi} - P_{ANNi})^2} \quad (6)$$

Vrednost ove greške može da pruži uvid u kvalitet merenja ili performanse modela, ali interpretacija konkretne vrednosti zavisi od konteksta problema i veličine podataka koji se analiziraju.

Kvadrat koeficijenta korelacije (R^2), koristi se za evaluaciju performansi modela tako što meri koliko dobro se model

prilagođava stvarnim podacima i ovo je treća metrika za koju ćemo primeniti za evaluaciju rezultata. R^2 može imati vrednosti između 0 i 1, gde veće vrednosti ukazuju na bolje prilagođavanje modela stvarnim podacima. Postupak izračunavanja je sledeći:

$$R^2 = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_{Hi} - P_{ANNi})^2}{\sum_{i=1}^N (P_{Hi} - \hat{P}_{Hi})^2} \right) \cdot 100[\%], \quad (7)$$

gde $\hat{P}_{Hi}$ predstavlja srednju vrednost stvarne vrednosti snage.

Dobijena vrednost R^2 može se interpretirati na sledeći način:

- $R^2 = 1$ (100 %): predviđeni podaci savršeno odgovaraju stvarnim podacima,
- $0 < R^2 < 1$: predviđeni podaci odgovaraju stvarnim podacima u određenoj meri, gde veće vrednosti ukazuju na bolje prilagođavanje,
- $R^2 = 0$: model ne pruža nikakvu poboljšanu predikciju u odnosu na prosečnu vrednost stvarnih podataka.

Mera da li su pojedini parametri u korelaciji pokazaće koeficijent korelacije (r). Koeficijent korelacije je statistička mera koja se koristi za merenje jačine i pravca linearnog odnosa (korelacije) između dve veličine. Izračunava se pomoću formule (8).

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i \cdot P_{Hi}) - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N P_{Hi}}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \cdot \sqrt{N \sum_{i=1}^N P_{Hi}^2 - \left(\sum_{i=1}^N P_{Hi} \right)^2}}, \quad (8)$$

gde x_i predstavlja vrednost jedne od veličina ulaznog sloja (H_s , Q , H_g , H_d ili θ_{rv}).

Ovaj koeficijent može da varira između -1 i 1, a to ima sledeće zčenje:

- ako je $r=1$: savršen pozitivan linearni odnos između veličina, što znači da rast jedne, proporcijalno prati rast druge veličine,
- ako je $r=-1$: savršen negativan linearni odnos između veličina, što znači da rast jedne, proporcijalno prati pad druge,
- ako je $r=0$: odsustvo linearnog odnosa između veličina.

Što je apsolutna vrednost koeficijenta korelacije bliža 1, to je jači linearni odnos između promenljivih. Oznaka "+" ili "-" ispred vrednosti r ukazuje na smer korelacije (pozitivan ili negativan).

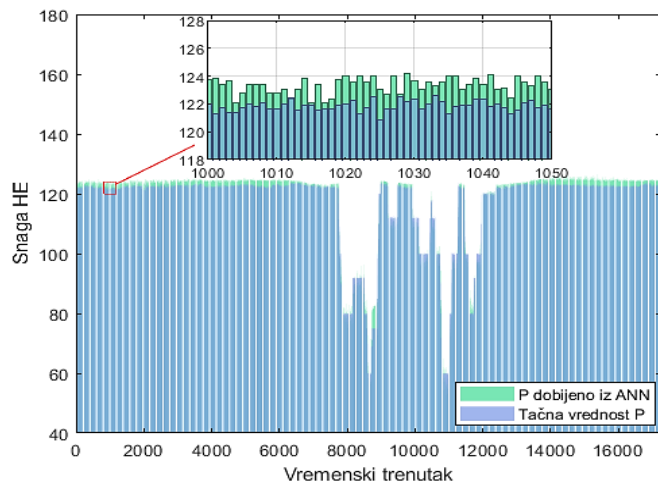
V PRIKAZ I EVALUACIJA REZULTATA

V.I Rezultati dobijeni primenom FF-ANN

Kao rezultat izvršenja programa kreiranog pomoću prvog modela veštačke neuronske mreže – FF-ANN prikazan je grafik poređenja predviđene snage i stvarne vrednosti snage očitane sa SCADA sistema - Slika 4. Rezultati evaluacije primenom različitih, pomenutih, metrika prikazani su u Tabeli 2.

Za predstavljenu ANN, vrednost MAE iznosi 1,68 MW. Imajući u vidu da su stvarne vrednosti snage unutar opsega od 59,65 MW

do 124,48 MW za mesec koji je analiziran, zaključujemo da je programirani model pokazao izuzetnu sposobnost predviđanja. Tabela 2 pruža detaljan prikaz rezultata, RMSE iznosi 1,81 %, dok kvadrat koeficijenta korelacije, R^2 , iznosi 98,37 %. Kombinacija ovih metrika doprinosi boljem razumevanju performansi modela i omogućava sveobuhvatnu evaluaciju efikasnosti modela u odnosu na varijacije podataka, dok rezultati nedvosmisleno ukazuju da programirani model ostvaruje visok stepen preciznosti u predviđanju izlazne snage HE. Ipak, rezultati mogu biti dodatno poboljšani drugim modelom.

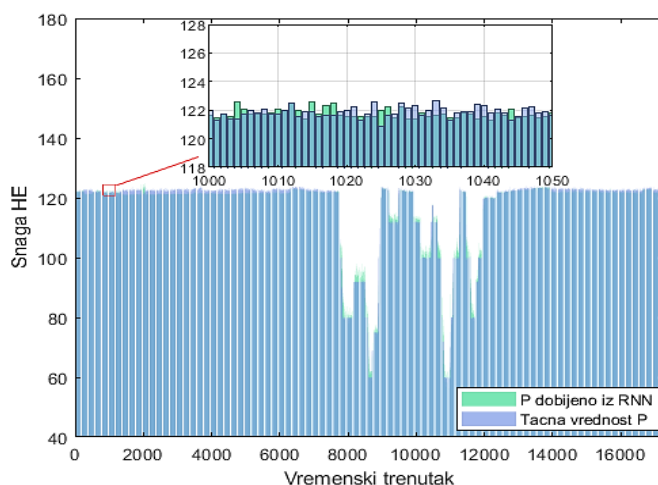


Slika 4. Prikaz snage na izlazu HE dobijene pomoću FF-ANN i stvarne vrednosti snage očitane sa SCADA sistema

Tabela 2. Evaluacija rezultata primenom različitih metrika za FF-ANN arhitekturu neuronske mreže

Metrika evaluacije	Vrednost greške
MAE [MW]	4,31
RMSE [%]	4,44
R^2 [%]	91,02

V.II Rezultati dobijeni primenom RNN



Slika 5: Prikaz snage na izlazu HE dobijena pomoću RNN i stvarne vrednosti snage očitane sa SCADA sistema

RNN prevazilazi FF-ANN u analizi sekvencijalnih podataka, ističući se po sposobnosti obrade informacija koje evoluiraju kroz vremenske korake, što doprinosi preciznijim predviđanjima. Kao rezultat izvršenja programa kreiranog pomoću drugog modela veštačke neuronske mreže prikazan je grafik poređenja predviđene snage i stvarne vrednosti snage očitane sa SCADA sistema - Slika 5. Rezultati evaluacije primenom različitih metrika prikazani su u Tabeli 3.

Tabela 3. Evaluacija rezultata primenom različitih metrika za RNN arhitekturu neuronske mreže

Metrika evaluacije	Vrednost greške
MAE [MW]	1,14
RMSE [%]	1,44
R^2 [%]	98,79

Za ovakvu arhitekturu ANN MAE iznosi 1,14 MW. Znajući da su stvarne vrednosti u ovom modelu, za mesec koji posmatramo, u opsegu od 59,65 MW do 124,48 MW, možemo zaključiti da programiran model daje dobra predviđanja. Za lakše poređenje rezultata dobijenih iz modela i tačnih vrednosti, u Tabeli 3 su prikazane i vrednosti parametara primenom različitih metrika. RMSE je 1,44 MW, R^2 iznosi visokih 98,79 %. Kombinacija ovih metrika pruža bolje razumevanje performansi modela i na osnovu dobijenih rezultata možemo reći da programiran model daje dobre rezultate u predviđanju izlazne snage HE.

VI ANALIZA ZNAČAJNOSTI ULAZNIH PROMENLJIVIH NA PERFORMANSE RAZVIJENIH MODELA

ANN ima sposobnost da nauči složene i nelinearne veze između različitih ulaznih podataka čak i ako na prvi pogled ti podaci ne deluju povezano. U sledećem delu ćemo ispitati korelisanost između veličina iz ulaznog sloja i izlazne veličine. Potom ćemo veličine koje su u najmanjoj i najvećoj korelaciji sa izlaznom snagom, pojedinačno isključiti iz prvobitne arhitekture ANN i izvršiti evaluaciju bez tog parametara. Na ovaj način ćemo proveriti koliko veličine koje naizgled nisu, odnosno jesu, u vezi sa snagom HE utiču na tačnost predikcije ANN.

U Tabeli 4 prikazane su vrednosti koeficijenta korelacije između svih pojedinačnih veličina iz ulaznog sloja i izlazne veličine neuronske mreže. Analizirajući ove koeficijente, možemo zaključiti da donja kota vode i protok kroz turbinu predstavljaju **ulazne** promenljive koje pokazuju najveću korelaciju sa izlaznom snagom. Nasuprot tome, temperatura ulazne rashladne vode i gornja kota vode pokazuju manju vezanost za promene u izlaznoj snazi. Dodatno, u prilogu ovim rezultatima, na Slici 6 prikazane su relativne promene svih ovih veličina, na osnovu analize 400 uzoraka.

Tabela 4. Koeficijenti korelacije za ulazne parametre i izlaznu snagu HE

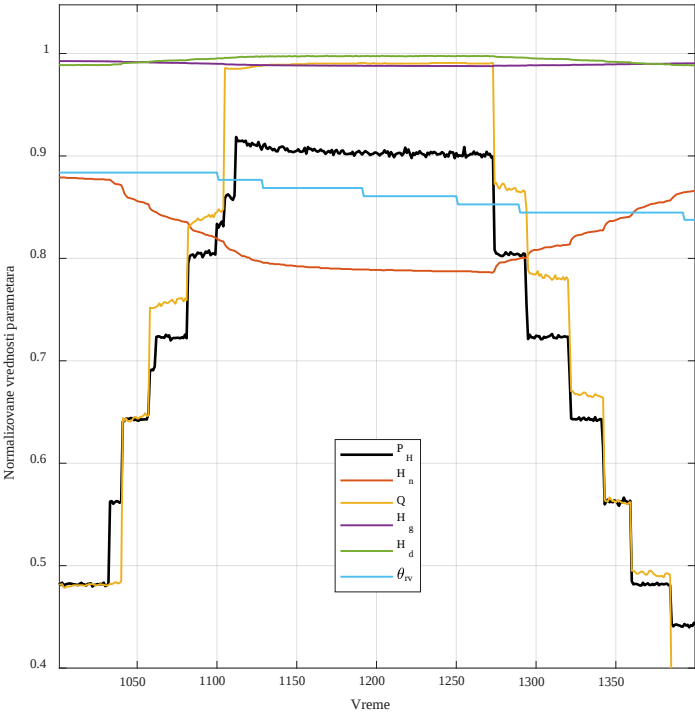
x_i	H_n [m]	Q $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	H_g [m]	H_d [m]	θ_{rv} [°C]
P_H [MW]					
$r(x_i, P_H)$ [%]	86,8	87,1	13,7	98,2	31,3

Prethodno navedeni rezultati detaljno prikazuju odnos između ulaznih i izlaznih veličina u okviru analiziranog sistema. U sledećim ANN će se ispitati da li odsustvo ulazne promenljive sa većim koeficijentom korelacije (Q) ili sa manjim koeficijentom korelacije (θ_{iv}) utiče na vrednost predviđene izlazne snage. Za izbor ova dva parametra odlučeno je na osnovu Jednačine (1), Tabele 4 i Slike 6.

Tabela 5. Evaluacija rezultata primenom različitih metrika kada je protok kroz turbinu izostavljen iz ulaznog sloja

Metrika evaluacije	Vrednost greške
MAE [MW]	4,31
RMSE [%]	4,43
R ² [%]	89,76

U Tabeli 5 prikazani su rezultati u slučaju kada je protok kroz turbinu izostavljen kao veličina ulaznog sloja. Arhitektura ove neuronske mreže ima 4 veličine u ulaznom sloju, 8 neurona u skrivenom sloju i jednu veličinu u izlaznom sloju. Protok kroz turbinu je, posmatrajući Jednačinu (4), Tabelu 4 i Sliku 6, veličina koja najbliže prati promenu snage, zbog čega su i očekivani lošiji rezultati potvrđeni.

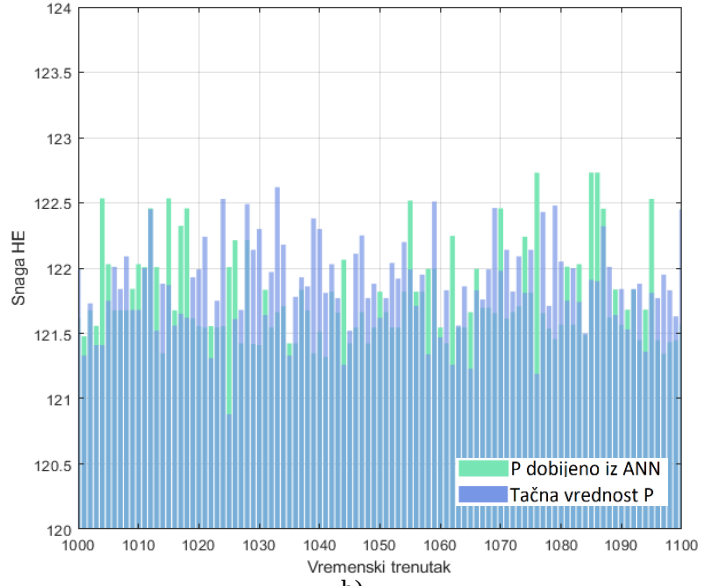
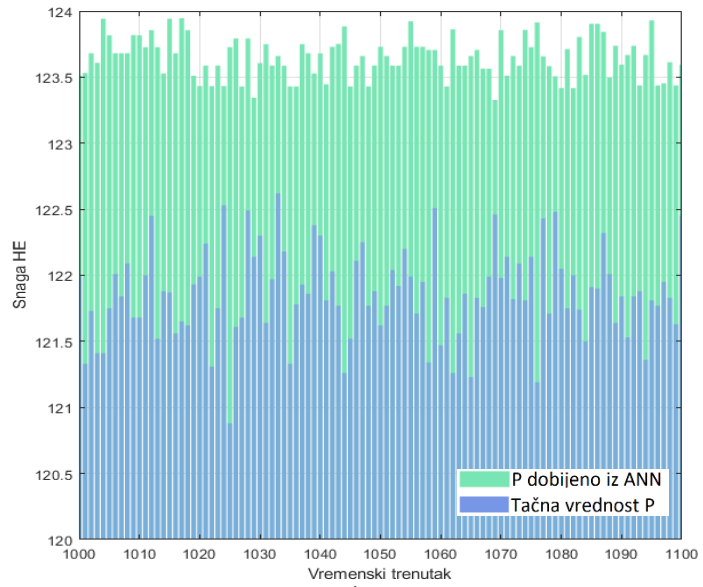


Slika 6. Relativne promene veličina iz ulaznog i izlaznog sloja na osnovu analize 400 uzoraka

Tabela 6. Evaluacija rezultata primenom različitih metrika kada je temperatura rashladne vode izostavljena iz ulaznog sloja

Metrika evaluacije	Vrednost greške
MAE [MW]	1,59
RMSE [%]	1,97
R ² [%]	97,96

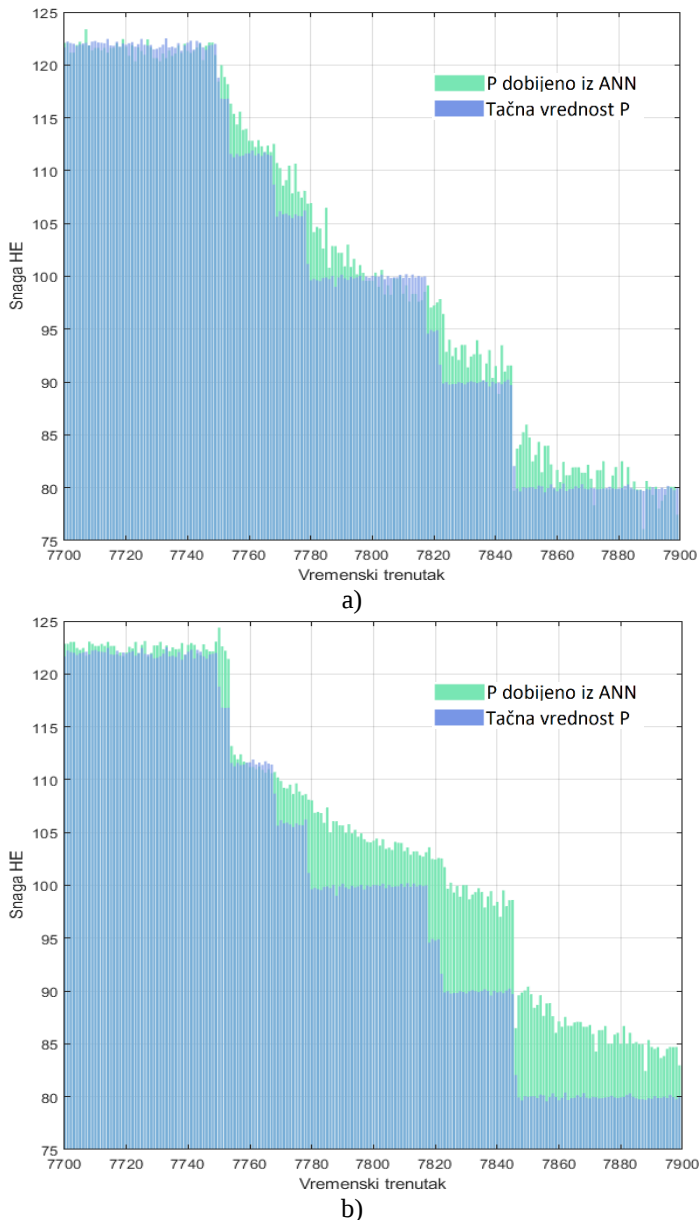
U Tabeli 6 prikazani su rezultati u slučaju kada je temperatura rashladne vode izostavljena kao veličina ulaznog sloja ANN. Arhitektura ove neuronske mreže ima 4 veličine u ulaznom sloju, 8 neurona u skrivenom sloju i jednu veličinu u izlaznom sloju. Temperatura rashladne vode je, posmatrajući Jednačinu (4), Tabelu 4 i Sliku 6, veličina koja najmanje utiče na izlaznu snagu. Očekivano, rezultati primenom različitih metrika evaluacije pokazuju da izostavljanje podatka o temperaturi rashladne vode neće mnogo uticati na vrednost izlazne snage.



Slika 7. Poređenje dobijenih izlaznih snaga primenom FF-ANN – a) i RNN – b) za spore i postepene promene protoka

Tokom ove analize primećeno je specifično ponašanje pomenutih modela ANN koje će biti obrazloženo u nastavku. Protok, kao veličina koja ima izuzetan uticaj na predikciju snage na izlazu HE, tokom posmatranog perioda može varirati ili imati približno konstantnu vrednost u određenim vremenskim intervalima. Logično, izlazna snaga prati te promene, a u narednom delu

pokazaćemo kako se pojedini tipovi ANN prilagođavaju tim promenama. Posmatrajmo slučaj kada su promene protoka spore i postepene. Takav je vremenski interval prikazan na Slici 7, gde su predstavljeni grafici poređenja izlazne snage HE, dobijene korišćenjem FF-ANN (a) i RNN (b) sa stvarnim vrednostima snage izmerenih putem SCADA sistema. Na osnovu prikazanih rezultata, primećujemo da je RNN arhitektura ostvarila preciznije rezultate u poređenju sa FF-ANN tokom analiziranog perioda. To je zbog povratne sprege koja je u arhitekturi ove mreže.



Slika 8. Poređenje dobijenih izlaznih snaga primenom FF-ANN – a) i RNN – b) za brze i nagle promene protoka

Suprotno, u slučaju brzih i naglih promena protoka, kakav je vremenski interval na Slici 8, osobina RNN da “pamti” prethodnu informaciju negativno utiče na predviđanje snage. U ovakvim slučajevima jednostavna arhitektura i jednosmerni tok predviđanja podataka, kakav je kod FF-ANN se pokazao kao bolje rešenje – Slika 8.

Možemo zaključiti da je korišćenje FF-ANN bolje za predikciju snage HE kada su promene protoka vode kroz turbinu nagle i brze, dok je korišćenje RNN bolje kada su promene protoka vode kroz turbinu spore i postepene. Klasterovanje podataka na periode odgovarajuće promene protoka a potom primena kombinacije FF-ANN i RNN predlog je optimalnog modela ANN za predikciju snage na izlazu HE.

VII ZAKLJUČAK

Korišćenje FF-ANN je preciznije za predikciju snage HE kada su promene protoka vode kroz turbinu nagle i brze, jer FF-ANN dobro obavljaju predviđanje u situacijama kada trenutne veličine iz ulaznog sloja direktno utiču na izlaznu veličinu, bez uzimanja u obzir prethodnog stanja sistema. Ovo je posebno korisno u situacijama kada su promene veličina u ulaznom sloju nagle prirode.

S druge strane, kada su promene protoka vode kroz turbinu postepene i spore, korišćenje RNN pokazalo se kao preciznije rešenje, jer mreže ovog tipa poseduju sposobnost adekvatnog reagovanja na postepene i spore trendove u podacima.

Koeficijent determinacije R^2 , zajedno sa MAE i RMSE, omogućava dublju analizu tačnosti modela u odnosu na stvarne podatke. Na osnovu tih metrika evaluacije možemo reći da oba kreirana modela – FF-ANN i RNN daju dobre rezultate.

Uzimajući u obzir promenljivu prirodu protoka, kao preporuku autori su postavili ideju o klasterovanju podataka kako bi se osiguralo poverenje u preciznost modela u svim uslovima rada i svih tipova HE, koji će u sebi sadržati kombinaciju FF-ANN i RNN modela neuronskih mreža. Takođe, proširenje analize na duži vremenski interval ili na više HE dodatno bi povećalo robusnost rezultata. Ove preporuke ostaju kao podsticajne smernice za buduća istraživanja.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-66 / 2024-03 / 200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Ranković, A., Maksimović, B.M., Sarić, A.T., Lukić, U. ANN-based correlation of measurements in micro-grid state estimation, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 25, No. 10, pp. 2181-2202, 2015. <https://doi.org/10.1002/etep.1956>
- [2] Warnick, C.C. *Hydropower Engineering*, Prentice Hall, 1984.
- [3] Thaeer, H.A., Mohd, H.B.S.N., Abdalla, A. Prediction of small hydropower plant power production in Himreen Lake dam (HLD) using artificial neural network, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 57, No. 1, pp. 211-221, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.12.011>
- [4] Artificial Neural Networks: An introduction to ANN theory and practice, in: Braspenning, P.J., Thuijsman, F., Weijters, A.J.M.M. (Ed.), *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 931, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1995.
- [5] McGonagle, J., Garcia, J.A., Mollick, S. Feedforward Neural Networks, <https://brilliant.org/wiki/feedforward-neural-networks/> [preuzeto 21.11.2023]
- [6] Hagan, M.T., Demuth, H.B., Bale, M. *Neural Network Design*, PWS Pub. Co., Boston, USA, 1996.
- [7] Lawrence, S., Giles, C.L., Tsoi, A.C. Lessons in neural network training: overfitting may be harder than expected, in *Proc. Proceedings of the*

- Fourteenth National Conference on Artificial Intelligence and Ninth Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference*, Providence, Rhode Island, pp. 540-545, 1997. https://cgliles.ist.psu.edu/papers/AAAI-97/overfitting.hard_to_do.pdf [preuzeto 21.11.2023]
- [8] Hansen, L.K., Salamon, P. Neural network ensembles, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 12, No. 10, pp. 993-1001, 1990. <https://doi.org/10.1109/34.58871>
- [9] Hochreiter, S. The vanishing gradient problem during learning recurrent neural nets and problem solutions, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, Vol. 06, No. 02, pp. 107-116, 1998. <https://doi.org/10.1142/S0218488598000094>
- [10] Đurić, M., Đurišić, Ž., Čukarić, A., Ilić, V. *Elektrane*, AGM, Beograd, 2014.
- [11] Hagan, M.T., Demuth, H.B., Bale, M. *Neural Network Design*, PWS Pub., Boston, USA, 1996.
- [12] Karayiannis, N.B., Venetsanopoulos, A.N. *Artificial neural networks: learning algorithms, performance evaluation, and applications*, Springer, USA, 1993.

AUTORI/AUTHORS

Stefan Čubonović - asistent, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, stefan.cubonovic@ftn.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-0240-5349](https://orcid.org/0000-0002-0240-5349)

Aleksandar Ranković - redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, aleksandar.rankovic@gmail.com, ORCID [0000-0002-7205-9584](https://orcid.org/0000-0002-7205-9584)

Marko Krstić, Akcionarsko društvo Elektroprivreda Srbije, marko.krstic996@gmail.com, ORCID [0009-0004-4706-405X](https://orcid.org/0009-0004-4706-405X)

The Application of Artificial Neural Networks for Predicting the Power Output of a Hydroelectric Power Plant

Abstract – The research paper analysed two types of artificial neural networks (ANN) for predicting the power output of a hydroelectric power plant. The first type is the feedforward artificial neural network (FF-ANN), while the second type is the recurrent neural network (RNN). Authors thoroughly analysed the steps taken in the process of implementing neural networks for this purpose, from data collection and preparation to training, evaluation, and results analysis. The input data includes net head, water flow through the turbine, upper water level, lower water level, and the temperature of the inlet cooling water. Based on the correlation coefficient of individual variables from the input layer with the output power, new ANN implementations were conducted. The results obtained from these variations were systematically analysed to achieve precise modelling, focusing on dynamic changes in water flow through the turbine.

Index Terms – Artificial neural network, FF-ANN, RNN, Hydroelectric power plant, Power output

Analiza uticaja različitih vrsta goriva na potrošnju i izduvne emisije brodskog dvotaktnog dizel motora

Draško Kovač, Sead Cvrk, Đorđe Nedeljkov

Univerzitet Crne Gore, Pomorski fakultet Kotor

Rezime - Dvotaktni dizel motori predstavljaju vitalnu komponentu pogona trgovačkih brodova, ali njihova upotreba teške nafte dovodi do ozbiljnih problema zagađenja okoline. Ovaj rad istražuje uticaj različitih vrsta goriva na potrošnju i izduvne emisije brodskog dvotaktnog dizel motora. U cilju smanjenja negativnih uticaja, istražene su alternative u vidu kvalitetnih dizel goriva i njihovih mješavina sa biodizelom. Primijenjena je eksperimentalna metoda za analizu performansi dvotaktnog dizel motora, najčešće korišćenog pogona u trgovačkom pomorskom saobraćaju. Korišćeni su čisti euro dizel i različite smjese euro dizela sa biodizelom dobijenim od otpadnog suncokretovog ulja u različitim odnosima (7%, 20%, 25%). Praćene su izduvne emisije, uključujući CO, CO₂, NO_x, SO₂ i O₂, tokom četiri različita režima rada motora. Eksperiment je sproveden na školskom brodu Jadran, koji je u sastavu Mornarice Vojske Crne Gore, dok je brod bio privezan u luci baziranja. Opterećenje motora, prilikom rada na vezu broda u luci, predstavlja posebnu pogonsku karakteristika motora koja se u literaturi naziva karakteristika teškog propelera. Rezultati ovog istraživanja pružaju uvid u efikasnost različitih vrsta goriva na performanse i ekološki aspekt rada dvotaktnog dizel motora u realnim eksploatacionim uslovima pomorskog saobraćaja.

Ključne reči - brodski dizel motor, dizel goriva, potrošnja goriva, izduvne emisije, karakteristike teškog propelera

I UVOD

Sektor pomorskog saobraćaja postao je ključna komponenta svjetske privrede. Svjetska flota brodova trgovačke mornarice broji preko 104000 [1]. Istovremeno, na godišnjem prosječnom nivou (2007.–2012.) emisija sa brodova čine oko 13 % sumpornih oksida (SO_x), odnosno oko 15 % azotnih oksida (NO_x) [2]. Zagađenje vazduha sa brodova regulisano je međunarodnom konvencijom o sprječavanju zagađenja sa brodova, MARPOL, kroz Aneks 6. Aneks 6 navedene konvencije utvrđuje ograničenja emisija NO_x i SO_x iz brodskih motora s unutrašnjim sagorijevanjem koji služe za pogon broda ili nekog drugog pomoćnog uređaja na brodu [3].

Biogoriva kao obnovljivi izvor energije prilikom sagorijevanja u brodskim motorima imaju značajno manju emisiju azotnih i sumpornih oksida u odnosu na brodska dizel goriva te ih mogu djelimično zamijeniti. Osnovni nedostaci biogoriva su ograničene količine sirovina i visoki troškove proizvodnje. Ipak, biodizel bi mogao biti opcija za smanjenje emisije zagađivača u pomorskom sektoru. Međutim, danas su praktična iskustva s uporabom biodizela u pomorskoj industriji vrlo oskudna. Primjena biodizela kao goriva za brodove testirana je u nekoliko istraživačkih

programa, gdje su uočene neke prednosti u odnosu na fosilna goriva [4], uključujući činjenicu da se biogorivo može mješati sa konvencionalnim dizelom u svim odnosima. Pri tome nisu otkrivene nikakve štetne posljedice po rad motora [4].

Međutim, uočeni su potencijalni problemi koji se ogledaju u činjenici a biogorivo djeluje kao otapalo i ima tendenciju omekšavanja i razgradnje određenih spojeva gume i elastomera koji se često koriste u starijim motorima te da može lako ukloniti naslage preostale nakon uporabe konvencionalnog dizel goriva što uzrokuje začepljenje filtera goriva. Ipak, studije Međunarodne pomorske organizacije pokazuju da se niske mješavine biogoriva i dizel goriva do 20 % (B20) mogu koristiti bez ikakvih izmjena na sistemima goriva brodskih motora[5]

U ovom radu istražen je utjecaj smjese biogoriva (FAME) i konvencionalnog dizel goriva na karakteristike izduvnih gasova kod brodskog dvotaktnog dizel motora.

Za eksperimentalno istraživanje je korišćen brodski dvotaktni reverzibilni dizel motor. Motor je sporohodni i ima pet cilindara od kojih su četiri radna a jedan cilindra služi kao klipni dvoradni kompresor za poprečno ispiranje, odnosno izmjenu radne materije.

Za istraživanje je korišćeno konvencionalno dizel gorivi i smjesa biogoriva sa dizel gorivom u odnosima 7 %, 20 % i 25 %.

Biodizel je proizveden u laboratorijskim uslovima, korišćenjem otpadnog suncokretovog ulja. Za proizvodnju biogoriva primijenjena je bazno katalitička transesterifikacija.

II EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

Eksperimentalni dio rada izveden je na školskom brodu Jadran (slika 1) koji se nalazi u formacijskom sastavu Mornarice Vojske Crne Gore. Školski brod "Jadran" je izgrađen u brodogradilištu "H. C. Silken Son" u Hamburgu, SR Njemačka u periodu od 1931 do 1933 godine. Osnovna namjena broda od izgradnje bila je obuka pomorskog kadra ratne i trgovačke mornarice Jugoslavije. Brod je motorni jedrenjak tipa "barkantin" sa deplasmanom od 787 tona i "dužinom preko svega" od 60 metara, a na vodnoj liniji 41 metar. Širina na glavnom rebru je 8,9 m, srednji gaz je 4,35 m, visina velejarbola 39,1 m.

U eksperimentalnom dijelu istraživanja izvedenom na brodu, za različite režime rada motora izmjeren je obrtni moment na propelerskom vratilu i potrošnja goriva za te režime. Pored mjerenja obrtnog momenta na propeleskom vratilu, za različite režime rada motora i različite vrste goriva, izmjeren je sastav izduvnih gasova motora. Mjerenje navedenih parametara

izvršeno je na vezu broda u luci što predstavlja vožnju sa teškim propelerom.



Slika 1. Školski brod Jadran, autorski prikaz

Motor je reverzibilni brodski dvotaktni dizel, model ALPHA 494R proizveden u fabrici brodskih motora "LITOSTROJ" u Ljubljani, Republika Slovenija (slika 2). Izrađen je po licenci "BURMEISTER", može se smatrati sporohodnim motorom jer postiže maksimalni broj obrtaja koljenastog vratila od 320 min⁻¹ i postiže maksimalnu snagu od 390 kW. Motor ima četiri radna cilindra i peti cilindar koji radi kao dvoradni klipni kompresor a namjenjen je za izmjenu radne materije u motoru (ispiranje cilindra). Prečnik cilindra je 290 mm a hod klipova je 490 mm.

Izlazna spojnica motora je spojena na propelersko vratilo a na propelersko vratilo je postavljen dvokrilni propeler sa fiksnim krilima. Prečnik propelera je 1850 mm, a prečnik propelerskog vratila je 162 mm. Prilikom mjerenja, motor je imao 18179 časova pogona od ugradnje, poslije generalnog remonta 4262 časa pogona i na njemu nisu rađene nikakve preinake za izvođenje eksperimenta [6].



Slika 2. Glavni brodski motor na školskom brodu Jadran, autorski prikaz

Za potrebe eksperimenta korišćeno je konvencionalno dizel gorivo i smjesa dizel i biogoriva od otpadnog suncokretovog ulja. Pripremljeni uzorci goriva su bili sledeći:

- čisto dizel gorivo - (ED),
- dizel 93 % i 7 % biodizel od suncokretovog ulja (28 litara+2,1 litar) - (BDS7),
- dizel 80 % i 20 % biodizel od suncokretovog ulja (24 litra+6 litara) - (BDS20),
- dizel 75 % i 25 % biodizel od suncokretovog ulja (22,5 litara+7,5 litara) - (BDS25).

Na osnovu fizičko-hemijske analize uzoraka goriva, određena je donja toplotna moć svakog uzorka pojedinačno što je prikazano u u Tabeli 1.

Tabela 1. Maseni udjeli pojedinih hemijskih elemenata i donja toplotna moć za sve uzorke goriva

Uzorci goriva	Maseni udjeli u %						H_d kJ/kg
	C	H	O	N	S	H ₂ O	
ED	84,26	13,6	1,807	0,32	0,0085	0,0041	43982,068
BDS7	80,21	13,05	6,604	0,12	0,0078	0,0080	41771,595
BDS20	80,44	12,83	6,438	0,27	0,0061	0,0153	41589,128
BDS25	78,32	13,12	8,436	0,10	0,0056	0,0177	40942,853

Donja toplotna moć određena je pomoću empirijske formule za tečna goriva [7]:

$$H_d = 339,13 \cdot c + 1193,24 \cdot \left(h - \frac{o+n}{8} \right) + 92,11 \cdot s - 25,12 \cdot w \quad (1)$$

U izrazu (1) su c , h , o , n , s i w procentualni maseni udjeli prisutnih hemijskih elemenata C, H, O, N, S i vode H₂O u gorivu.

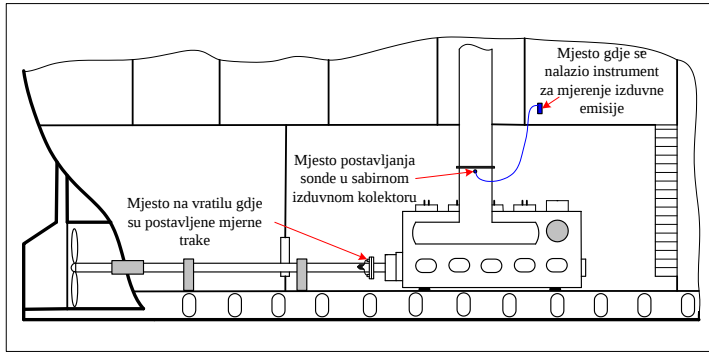
Mjerenje potrošnje goriva vršeno je pomoću elektronske vage. Mjerenje je vršeno tako što se iz posebne posude napajao sistem goriva motora čija se masa mjerila na početku i na kraju mjerenja parametara motora na odabranim režimima uz registrovanje dužine vremenskog intervala.

Za mjerenje obrtnog momenta na propelerskom vratilu korišćena

je sledeća oprema: mjerne trake, višekanalna elektronska jedinica za mjerenje dinamičkih veličina "spider 8" i personalni računar. Softverski paket koji omogućava mjerenje i obradu izmjerenih podataka je "catman 3.0". Navedena oprema, odnosno hardver i softver proizvedeni su u firmi "HOTTINGER BALDWIN MESSTEHNİK (HBM)", Darmstadt iz SR Njemačke.

Mjerenje obrtnog momenta na propelerskom vratilu izvršeno je postavljanjem mjernih traka i mjerne opreme na propelersko vratilo glavnog motora. Mjesto postavljanja mjernih traka na propelersko vratilo je poslije spojnice motora sa vratilom. Propelersko vratilo na glavnom motoru školskog broda Jadran je punog poprečnog presjeka prečnika 162 mm, izrađeno je od kovanog čelika čiji je modul elastičnosti $E=215 \text{ kN/mm}^2$. Na propelersko vratilo su postavljena dva para mjernih traka tip

"XY21-6/350" koje su povezane u Wheatston-ov most [8].



Slika 1. Mjesto postavljanja mjerne opreme

Za mjerenje sastava izduvnih gasova glavnog brodskog dizel motora korišćen je gasni analizator "testo 350 MARITIME" [9]. Testo 350 je prenosni analizator produkata sagorijevanja, koji se može koristiti kao sistemska komponenta unutar kompletnog sistema za mjerenje sastava dimnih gasova iz brodskih dizel motora u skladu sa konvencijom "MARPOL 73/78 Aneksom 6" i NO_x tehničkim kodom 2008 (MEPC.177 (58)). Instrument se sastoji od kontrolne jedinice (upravljačka jedinica za prikazivanje i očitavanja) i kućišta analizatora (mjerni instrument). Spojni kontakti, kablovi za prenos podataka ili bluetooth (opcija) se koristi za povezivanje upravljačke jedinice sa kućištem analizatora.

Tabela 2. Izmjerene vrijednosti obrtnog momenta, snage i potrošnje goriva na odabranim režimima rada motora

Vrsta goriva	Režim rada motora	Obrtni moment M [Nm]	Snaga koju troši propeler P [kW]	Časovna potrošnja goriva [kg/h]
Čisto dizel gorivo	N 150	4267	67	15,30
	N 180	5611	105	23,20
	N 210	7649	168	36,20
	N 210 KSD	8380	184	38,60
Smjesa dizela i 7 % biodizela od suncokretovog ulja	N 150	4267	67	16,00
	N 180	5611	105	24,45
	N 210	7649	168	38,10
	N 210 KSD	8380	184	40,65
Smjesa dizela i 20 % biodizela od suncokretovog ulja	N 150	4267	67	16,10
	N 180	5611	105	24,55
	N 210	7649	168	38,25
	N 210 KSD	8380	184	40,85
Smjesa dizela i 25 % biodizela od suncokretovog ulja	N 150	4267	67	16,35
	N 180	5611	105	24,95
	N 210	7649	168	38,85
	N 210 KSD	8380	184	41,50

3.2 Emisija izduvnih gasova

Istraživanje sastava izduvnih gasova vršeno je na tri različita broja obrtaja koljenastog vratila motora a na 210 o/min za dva različita opterećenje.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da je uticaj promjene broja

III EKSPERIMENTALNI REZULTATI

3.1 Parametri rada glavnog motora

Izmjerene vrijednosti obrtnog momenta, snage i časovne potrošnje za sve vrste goriva na odabranim režimima rada glavnog motora prikazane su u tabeli 2. Odabrana su četiri režima rada i to tri režima u vožnji naprijed (N 150, N 180 i N 210) i jedan režim u vožnji krmom kada je zakrenuto kormilo sasvim desno (N 210 KSD). Pošto je brod vezan uz obalu ovakav režim rada motora može se smatrati stacionarnim jer nema uticaja vanjskih uslova na rad i promjenu opterećenja (uticaj vjetrova, morske struje, talasa i dr.).

Efektivna snaga koja se predaje od motora propeleru može da se izrazi preko obrtnog momenta koji se sa koljenastog vratila motora prenosi preko spojnice na propelersko vratilo, pri čemu se ono obrće ugaonom brzinom ω [7]:

$$P_e = M \cdot \omega \quad (2)$$

gde su:

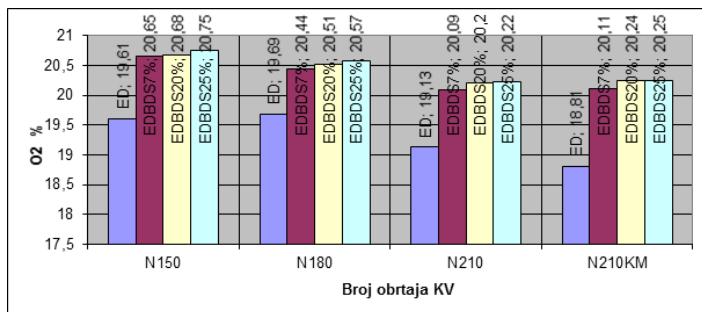
- P_e [W], snaga koju motor predaje propeleru,
- M [Nm], obrtni moment propelera,
- ω [rad/s], ugaona brzina propelerskog vratila.

Izmjereni podaci o potrošnji goriva pokazuju da je potrošnja različita za sve vrste goriva na odabranim režimima rada motora.

obrtaja koljenastog vratila motora na proces sagorijevanja a time i na sastav izduvnih gasova veoma kompleksan. Sa promjenom broja obrtaja koljenastog vratila motora mijenja se ugao početka i kraja ubrizgavanja, koeficijent punjenja, koeficijent zaostalih gasova, sastav smjese, intenzitet turbulencije radnog medija u kompresionom prostoru, termički nivo prostora za sagorijevanje,

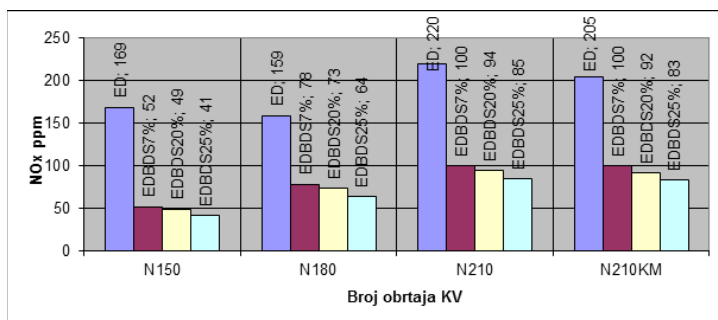
vrijeme trajanja procesa sagorijevanja i drugi parametri ciklusa što sve značajno utiče na sastav izduvnih gasova.

Istraživanje pokazuje da se procenat O_2 u izduvnim gasovima smanjivao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora i povećavao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora (slika 4). Procenat O_2 u izduvnim gasovima motora se povećavao sa povećanjem procentualnog udjela biodizel goriva u smjesi sa dizel gorivom. To je posledica većeg sadržaja kiseonika u biogorivu.



Slika 2. Izmjerene vrijednosti O_2 za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora

Istraživanje pokazuje da se procenat NO_x u izduvnim gasovima povećavao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora, a smanjivao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora (slika 5). Procenat NO_x u izduvnim gasovima motora se smanjivao sa povećanjem procentualnog udjela biogoriva u smjesi sa dizel gorivom. Dosadašnja istraživanja su pokazala da kod dizel motora tokom procesa sagorijevanja goriva u cilindru nastaje samo azot-monoksid (NO). Ostali azotni oksidi nastaju u izduvnom kolektoru i atmosferi. Veći sadržaj azotnih oksida je posledica visokih temperatura i pritiska tokom procesa sagorijevanja. Veće vrijednosti koeficijenta viška vazduha i manji ugao ubrizgavanja goriva doprinosi smanjenju azotnih oksida. Imajući u vidu navedeno te da je mjerenje vršeno na manjim opterećenjima motora i manjim termičkim opterećenjima jedno je od mogućih objašnjenja za dobijene rezultate istraživanja.

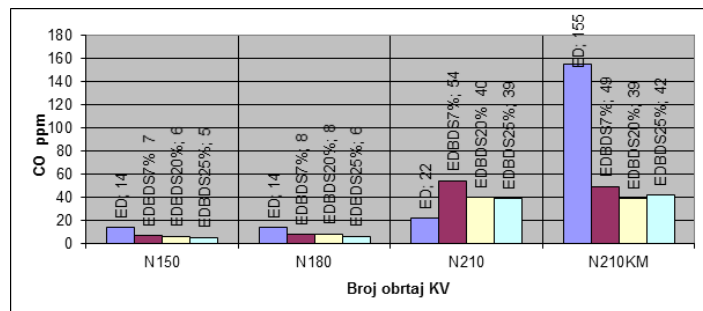


Slika 3. Izmjerene vrijednosti NO_x za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora

Pored navedenog mogući razlozi za smanjenje NO_x za smjese sa većim procentom biodizela jeste što iste imaju veći cetanski broj i niži aromatski sadržaj u poređenju sa čistim eurdizel gorivom.

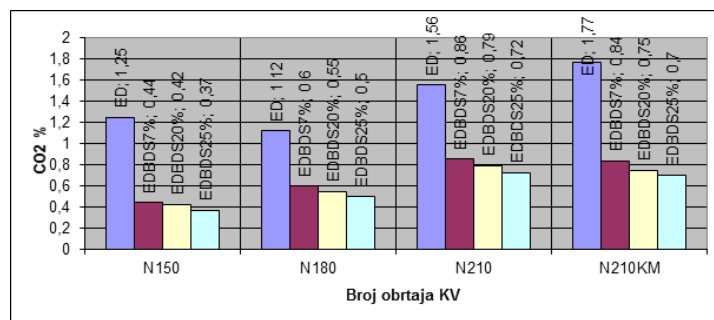
Veći cetanski broj je povezan sa kašnjenjem samozapaljenja goriva, sporijim rastom pritiska i nižim temperaturama procesa sagorijevanja što smanjuje emisiju NO_x u izduvnim gasovima [10, 11].

Istraživanje pokazuje da se procenat CO u izduvnim gasovima povećavao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora a uglavnom se povećavao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora. Procenat CO u izduvnim gasovima motora se smanjivao sa povećanjem procentualnog udjela biogoriva u smjesi sa dizel gorivom. Istraživanja pokazuju da CO nastaje kao produkt nepotpunog sagorijevanja zbog nedostatka kiseonika. Razlog za ovakav trend može se objasniti što na većim brojevima obrtaja koljenastog vratila motora i većim opterećenjima odnos vazduha i goriva je manji, odnosno smjesa vazduha i goriva je bogatija [11, 12, 13].



Slika 4. Izmjerene vrijednosti CO za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora, autorski prikaz

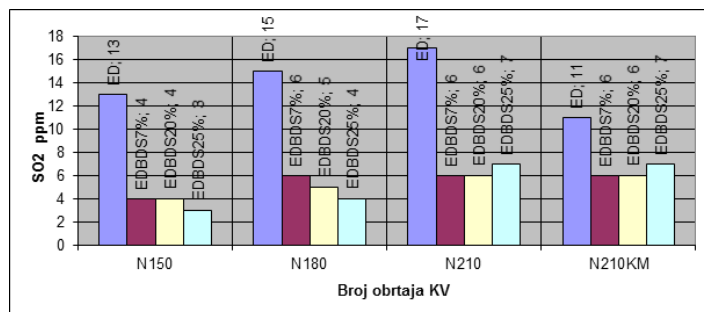
Istraživanje pokazuje da se procenat CO_2 u izduvnim gasovima povećavao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora i smanjivao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora. Procenat CO_2 u izduvnim gasovima motora se smanjivao sa povećanjem procentualnog udjela biogoriva u smjesi sa dizel gorivom. Razlog za ovakav trend može se potražiti u nižim procentualnim udjelima ugljenika i vodonika za biodizelske smjese u odnosu na čisto dizel gorivo što uslovljava i niži procenat emisije CO_2 [14, 15].



Slika 5. Izmjerene vrijednosti CO_2 za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora

Istraživanje pokazuje da se procenat SO_2 u izduvnim gasovima povećavao što se povećavao broj obrtaja koljenastog vratila motora, a uglavnom se smanjivao sa povećanjem opterećenja na istom broju obrtaja koljenastog vratila motora. Procenat SO_2 u

izduvnim gasovima motora se smanjivao sa povećanjem procentualnog udjela biogoriva u smjesi sa dizel gorivom. Posledica nastanka sumpornih-oksida u izduvnim gasovima dizel motora su zbog prisustva sumpora u gorivu. Istraživanja pokazuju da uzorci goriva sa većim sadržajem sumpora imaju i veću koncentraciju SO_2 u izduvnim gasovima.



Slika 6. Izmjerene vrijednosti SO_2 za različite smjese dizel i biodizel goriva od suncokretovog ulja na odabranim režimima rada motora, autorski prikaz

Međutim, smanjenje sumpora u gorivu smanjuje podmazujuće osobine goriva što je posebno izraženo kod klipnih pumpi visokog pritiska goriva [16].

VII ZAKLJUČAK

U ovoj istraživanju analizirana je potrošnja i utjecaj biogoriva druge generacije (FAME) na karakteristike izduvne emisije iz brodskog dizel motora. Korišten je reverzibilni dvotaktni brodski dizelski motor sa poprečnim ispiranjem, odnosno izmjenom radne materije.

Motor je bio pogonjen čistim dizel gorivom i mješavinama od 7%, 20% i 25% dizel goriva biogoriva od otpadnog suncokretovog ulja.

Iz eksperimentalnih rezultata može se zaključiti sledeće:

- postoji trend smanjenja emisije NO_x pri korištenju mješavina biogoriva, što se može pripisati njihovom većem cetanskom broju i nižem sadržaju aromata,
- postoji trend smanjenja emisije CO pri korištenju mješavina biogoriva, što se može pripisati većim sadržajem kiseonika u biogorivu,
- postoji trend smanjenja emisije CO_2 pri korištenju mješavina biogoriva, što se može pripisati nižem udjelu ugljenika i vodonika a većim udjelima kiseonika u biogorivu,
- postoji trend smanjenja emisije SO_2 pri korištenju mješavina biogoriva, što se može pripisati nižem udjelu sumpora u njima,
- potrošnja goriva za iste režime se povećavala što se povećavao udio biogoriva i smjesi.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-66 / 2024-03 / 200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] International Maritime Organization (IMO), *International shipping facts and figures - information resources on trade, safety, security, environment*, 2012. <https://nmsmontereybay.blob.core.windows.net/montereybay-prod/media/resourcepro/resmanissues/pdf/120601shippingfacts.pdf> [pristupljeno 29.01.2024]
- [2] International Maritime Organization (IMO), *Third IMO GHG Study 2014 - Final Report*, MEPC 67/INF.3, 2014. <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/third-imo-ghg-study-2014-executive-summary-and-final-report.pdf> [pristupljeno 29.01.2024]
- [3] International Maritime Organization (IMO), Note by the International Maritime Organization to the forty-third session of the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (SBSTA 43) Paris, France, 1 to 4 December 2015. Agenda item 10(c) Emissions from fuel used for international aviation and maritime transport. Update on imo's work to address emissions from fuel used for international shipping, 2015.
- [4] Florentinus, A., Hamelinck, C., van den Bos, A., Winkel, R., Cuijpers, M. *Potential of biofuels for shipping – Final Report*, Ecofys, European Maritime Safety Agency (EMSA), Project number: BIONL11332, 2011.
- [5] IMO, 2007. *Feasibility study into the use of biofuels in the Norwegian domestic fleet*, Marine Environment Protection Committee, 57th session, Agenda item 4.
- [6] Osnovna brodska knjiga školskog broda Jadran
- [7] Živković, M.C. *Motori sa unutrašnjim sagorijevanjem: I dio teorija motora*, Mašinski Fakultet, Beograd, 1985.
- [8] Messtechnik, H.B. *HBM measurement techniques and catman*, HBM Darmstadt, Berlin, 2001.
- [9] Testo 350 MARITIME V2-flue gas analyzer, Instruction manual, <https://static.testo.com/image/upload/Instruction-manual-and-Software/Instruction-manuals/testo-350-maritime-instruction-manual.pdf> [pristupljeno 29.01.2024]
- [10] Monym, A., Gerpen, J.H. *The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions*, Biomass and Bioenergy, Vol. 20, No. 4, pp. 317-325, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00095-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00095-7)
- [11] Gumus, M., Kasifoglu, S. *Performance and emission evaluation of a compression ignition engine using a biodiesel (apricot seed kernel oil methyl ester) and its blends with diesel fuel*, Biomass and Bioenergy, Vol. 34, No. 1, pp. 134-139, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.010>
- [12] Usta, N., Ozturk, E., Can, O., Conkur, E.S., Nas, S. *Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a diesel engine*, Energy Conversion Management, Vol. 46, No. 5, pp. 741-755, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.05.001>
- [13] Lertsathapornsuka, V., Pairintrab, R., Aryasukb, K. *Krisnangkura K. Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator*, Fuel Processing Technology, Vol. 89, No. 12, pp. 1330-1336, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.024>
- [14] Ozsezen, A.N., Canakci, M., Turkan, A. Sayin C. *Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters*, Fuel, Vol. 88, No. 4, pp. 629-636, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.023>
- [15] Utlu, Z., Kocak, M.S. *The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions*, Renew Energy, Vol. 33, No. 8, pp. 1936-1941, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.10.006>
- [16] Muñoz, M., Moreno, F., Monné, C., Morea, J., Terradillos, J. *Biodiesel improves lubricity of new low sulphur diesel fuels*, Renew Energy, Vol. 36, No. 11, pp. 2918-2924, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.007>

AUTORI/AUTHORS

mr Draško Kovač - stručni saradnik, Univerzitet Crne Gore, Pomorski fakultet Kotor, draskokovac@ucg.ac.me,

dr Sead Cvrk - redovni profesor, Univerzitet Crne Gore, Pomorski fakultet Kotor, cvrk@t-com.me, ORCID [0000-0002-2717-4428](https://orcid.org/0000-0002-2717-4428)

Đorđe Nedeljkov- laborant, Univerzitet Crne Gore, Pomorski fakultet Kotor

Analysis of the Impact of Different Fuel Types on Fuel Consumption and Exhaust Emissions of a Two-Stroke Marine Diesel Engine

Abstract – Two-stroke diesel engines are a vital component of merchant ship propulsion, but their use of heavy fuel oil contributes significantly to environmental pollution. This paper explores the impact of different fuel types on the fuel consumption and exhaust emissions of a two-stroke diesel engine used in maritime transport. In an effort to reduce these negative impacts, alternatives in the form of high-quality diesel fuels and their blends with biodiesel have been investigated. An experimental method was applied to analyse the performance of the two-stroke diesel engine, commonly used in commercial maritime traffic. Pure Euro diesel and various blends of Euro diesel with biodiesel obtained from waste sunflower oil were used in different proportions (7%, 20%, 25%). Exhaust emissions, including CO, CO₂, NO_x, SO₂, and O₂, were monitored during four different engine operating regimes. The experiment was conducted on the training ship Jadran, part of the Navy of Montenegro, while the ship was docked in the homeport. The engine load during moored ship operations represents a specific propulsion characteristic known as the heavy propeller loading, as referred to in the literature. The results of this research provide insights into the efficiency of different fuel types on the performance and ecological aspects of the two-stroke diesel engine under real operational conditions in maritime traffic.

Index Terms – Marine diesel engine, Diesel fuels, Fuel consumption, Exhaust emissions, Heavy propeller characteristics

Analiza ispunjenosti uslova za mernu nesigurnost sistema za kontrolu pametnih brojila i smanjenje vremena provere registra

Dorđe Dukanac

Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd

Rezime - U ovom radu se ispituju rezultati primene i postojanje sprege između dva uslova, koja su bitna pri kontrolisanju brojila u cilju mogućeg smanjenja vremena njegovog izvršavanja. Prema Pravilniku o brojlama aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S, zadat je prvi uslov za proširenu mernu nesigurnost mernog sistema za kontrolu brojila u odnosu na najveću dozvoljenu grešku brojila. Prvi cilj ovog rada je da se proverí da li je ovaj prvi uslov najkritičniji za $\cos\varphi=0,25$ induktivno ili $\cos\varphi=0,5$ kapacitivno, koji se zadaju na poseban zahtev korisnika brojila. U gorepomenutom Pravilniku i Međunarodnoj preporuci OIML R 46-1/-2, zadat je drugi uslov koji će da bude analiziran, za relativnu razliku između energije na ispitnom izlazu i očitane energije na registru u odnosu na najveću dozvoljenu grešku brojila. Korišćeni su etalon klase tačnosti 0,02 i brojilo za indirektnu vezu klase tačnosti 0,2 S za aktivnu energiju. Drugi cilj ovog rada je da se analizira da li, u smislu opravdanosti smanjenja vremena provere registra aktivne energije brojila, prvi uslov može da bude olakšavajući činilac. Dalje će da se razmotri da li ovaj drugi uslov može da se ublaži za brojila klase tačnosti 0,2 S, s obzirom na uobičajenu očekivanu ukupnu relativnu grešku koja se dobija pri proverí registra za aktivnu energiju i preciznost i tačnost korišćenih brojila te klase.

Ključne reči - merna nesigurnost, pametno brojilo, električna energija, provera registra, rezolucija, klasa tačnosti

I UVOD

Pametna brojila su nova generacija brojila električne energije. Prema članku iz „Politike“ od 2. decembra 2023. godine, u Srbiji ima ukupno 3,7 miliona brojila električne energije. Od toga je nešto više od 157.000 pametnih brojila, što je oko 4,1% od ukupnog broja [1]. Dobavljači ih montiraju kao deo nacionalnog vladinog programa za zamenu starijih brojila električne energije za domaćinstva u elektrodistributivnom sistemu.

S druge strane, pametna brojila ugrađena su na sva 702 obračunska merna mesta i 262 kontrolna merna mesta u prenosnom sistemu, na mestima primopredaje električne energije u objektima Akcionarskog društva „Elektromreža Srbije“ (EMS AD), „Elektroprivrede Srbije“ AD, kao i ostalih korisnika, čiji su objekti direktno priključeni na prenosni sistem [2].

Pametna brojila omogućuju korisniku i snabdevaču tačne i pravilno ažurirane podatke u približno realnom vremenu (obično na svakih 15 minuta) o korišćenoj električnoj energiji preko bežične električne mreže. Na taj način je omogućeno uočavanje neefikasnosti i perioda prekomerne potrošnje, na osnovu čega se prave planovi uštede energije i smanjenja troškova utrošene

električne energije.

Prema Zakonu o metrologiji, pametna brojila se overavaju po prvi put, redovno ili u vanrednim slučajevima [3]. Overavanje brojila predstavlja potvrdu, stavljanjem žigova na brojilo i izdavanjem uverenja o overavanju brojila, da je ono u skladu sa odobrenim tipom brojila, a posle sprovedenog postupka pregleda (tj. provere, kontrolisanja ili ispitivanja) brojila. Jedno od obaveznih merenja je i provera registara električne energije brojila.

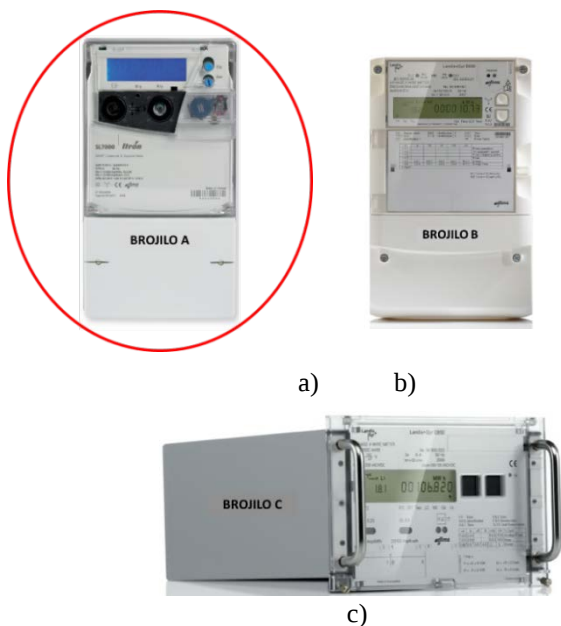
„Primarno“ podešavanje električnih brojila u MWh-ima je bolje u odnosu na sekundarno podešavanje brojila u kWh-ima (sa rezolucijom na tri decimalna mesta), jer se očitavaju prave vrednosti električne energije neposredno sa ekrana brojila, i što je vrlo značajno, osetno se smanjuju greške merenja mesečnih gubitaka na elementima elektroenergetskog sistema (EES-a) [4,5].

U radu [5] je istaknuto da se rezolucija registra ekrana brojila pri „primarnom“ podešenju u MWh-ima, na 1 ili 2 decimalna mesta, bira zavisno od moguće protekle registrovane godišnje aktivne električne energije, vrednosti konstante brojila i pod uslovom da se u električnom brojilu čuvaju snimljena stanja svih podešenih registara za aktivnu energiju najmanje za dvanaest meseci unazad. U radu [6], istaknuto je da bi vreme provere registra električne energije moglo da se podeli sa dva, ako bi se umesto očigledne rezolucije registra energije sa ekrana brojila uzela stvarna (prava) rezolucija registra, u slučaju kada je unutrašnja rezolucija brojila bar dva puta veća od očigledne rezolucije registra.

Radi efikasnosti, odnosno smanjenja vremena overavanja brojila, potrebna je dodatna analiza svrsishodnosti predugačkog vremena provere registara aktivne energije, koje oduzima značajno vreme tokom kontrolisanja brojila. U ovom radu analizirani su postojanje i rezultati primene sprege između dva uslova, koja su bitna pri kontrolisanju brojila, na osnovu značenja veličina koje su prisutne u svakom od tih uslova i međusobne zavisnosti između njih. Prvi je uslov koji treba da bude ispunjen za proširenu mernu nesigurnost mernog sistema za kontrolisanje brojila, a drugi je uslov za proveru registra energije brojila. Utvrđeno je pri kom faktoru snage je proširena merna nesigurnost mernog sistema najkritičnija u odnosu na najveću dozvoljenu grešku brojila. Pored uvažavanja uticaja unutrašnje rezolucije brojila, ispitano je dodatno u kakvom je odnosu drugi uslov za proveru registra energije prema ukupnoj relativnoj grešci energije koja se dobija na kraju merenja, a sve u cilju dodatnog smanjenja vremena provere registra energije.

II PRIMER BROJILA OZNAKE A KOJE NEMA MOGUĆNOST PRIKAZA ENERGIJE NA 4 DECIMALNA MESTA NI U JEDNOM REŽIMU

Na slici 1. prikazana su dva najčešće korišćena brojila za merenje električne energije u prenosnom sistemu u Srbiji: 1) brojilo oznake A na slici 1a) [7] i 2) brojilo oznake B (npr. serije 4, sa belim kućištem) na slici 1b) [8], dok je na slici 1c) prikazano visokoprecizno brojilo oznake C koje se koristi u prenosnom sistemu na mernim mestima na kojima se vrši prekogranična primopredaja električne energije [9].



Slika 1. a), b) i c) Brojila oznaka A, B i C koja se koriste na mernim mestima u prenosnom sistemu u Srbiji. Brojilo oznake A je bez mogućnosti rada sa rezolucijom na 4 decimalna mesta u normalnom i ispitnom režimu [7]

Ova tri brojila se koriste za merenje aktivne električne energije na visokonaponskim (VN) izvodima elemenata EES-a, na nominalnim naponima 110 kV, 220 kV i 400 kV. Uvek su ova brojila: trofazna, četvorožična, za posredni priključak preko mernih transformatora, klase tačnosti 0,2 S, naznačene struje 1 A, maksimalne struje 2 A i naznačenog faznog napona 57,74 V. Uzimajući u obzir veličine elektroenergetskih postrojenja na pomenutim nominalnim visokim naponima, sa manjom naznačenom strujom električnih brojila od 1 A smanjuju se Džulovi gubici u spojnim kablovima između strujnih mernih transformatora i brojila, koji su srazmerni struji na kvadrat, i smanjuju se padovi napona na tim spojnim kablovima.

Za primenu u merenju električne energije u navedenim VN postrojenjima, u praksi u prenosnom sistemu Srbije, merna konstanta: 1) brojila oznake A je uvek 10000 imp./kWh, 2) brojila oznake B može da bude [10000, 20000, 50000 i 100000] imp./kWh i 3) brojila oznake C je obično 50000 imp./kWh.

U ispitnom režimu (test mode-u) brojila električne energije povećava se rezolucija njegovog registra električne energije, čija se vrednost prikazuje na ekranu brojila. Tako se dobijaju kraći intervali merenja električne energije u ispitnom režimu koji ne bi poremetili podatke o obračunu električne energije dobijene u normalnom režimu.

Brojila oznaka B i C imaju osmocifarski registar električne energije čija se vrednost prikazuje na ekranu brojila. Ovaj registar može da se podesi za prikazivanje „sekundarne“ energije u kWh-ima na četiri decimalna mesta u normalnom režimu. Međutim, ako je registar unapred podešen na tri decimalna mesta u normalnom režimu, postoji mogućnost njegovog prebacivanja u ispitni režim sa četiri decimalna mesta. Tako se vreme provere svakog od tarifnih registara aktivne energije za brojila oznaka B i C smanjuje za po 10 puta, u odnosu na slučaj „sekundarno“ podešenog brojila oznake A sa radnom rezolucijom na tri decimalna mesta, koje nema niti normalni stalni, pa tako ni ispitni privremeni režim sa 4 decimalna mesta.

U članku [4] pokazano je da se sa „primarnim“ podešavanjem brojila u MWh-ima značajno smanjuje vreme provere njegovog registra aktivne električne energije, u odnosu na slučaj sa „sekundarno“ podešenim brojilom u kWh-ima sa rezolucijom na tri decimalna mesta. Brojila oznake A imaju devetocifarski ekran. U radu [5] je pokazano da bi se najveća moguća vrednost električne energije od 999999,999 kWh na ekranu brojila dostigla za 677,6 godina kod brojila oznake A, sa „sekundarnim“ podešenjem u kWh-ima, sa rezolucijom na tri decimalna mesta. Vidi se da su brojila oznake A namerno projektovana sa 9 sigurnih cifara na ekranu, da bi se olakšalo očitavanje električne energije pri „primarnom“ podešavanju u MWh-ima, sa što manjim brojem prelaza vrednosti akumulirane energije u registru energije tokom vremena na nulu, u trenucima kada ta vrednost energije u registru dođe do najveće moguće vrednosti.

Međutim, i dalje je uobičajena praksa za merenje električne energije u prenosnom sistemu u Srbiji, za nominalne napone 110 kV i više, da trofazna brojila za indirektni priključak rade pri „sekundarnom“ podešenju u kWh-ima, sa radnom rezolucijom registra energije na najviše tri decimalna mesta. Ovo je pogodno za zaposlene za obračunsko i kontrolno merenje električne energije, jer ne moraju da misle o prenosnim odnosima mernih transformatora na čije se sekundarne krajeve priključuju brojila koja odnose na teren radi ugradnje (jer su tada prenosni odnosi struja i napona zadati u brojilima 1:1). Međutim, zaposleni za obračun električne energije onda moraju da množe sekundarnu električnu energiju očitavanu sa svakog brojila sa odgovarajućim prenosnim odnosima strujnih i naponskih mernih transformatora, kako bi se dobili pravi podaci za primarnu električnu energiju. Na ovaj način, originalni podatak za „sekundarnu“ energiju očitavanu sa svakog brojila se naknadno menja za potrebe obračuna električne energije. Takođe, troškovi ispitivanja „sekundarno“ podešenog brojila u kWh-ima na tri decimalna mesta su veći u odnosu na troškove ispitivanja „primarno“ podešenog brojila u MWh-ima na 1 ili 2 decimalna mesta zavisno od godišnje očekivane energije, zbog ukupne dužine trajanja kontrolisanja brojila klase 0,2 S.

Podsticaj za pisanje ovog rada bila je činjenica da se, prema Pravilniku o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S iz 2016. godine [10], dobijaju preduga vremena provera registara aktivne električne energije primenom očigledne rezolucije registara na tri decimalna mesta u kWh-ima, kod brojila podešenog na „sekundarni“ način, kada se na ekranu brojila očitavaju vrednosti izmerene električne energije sa sekundara strujnih i naponskih mernih transformatora.

Brojila oznake A nemaju niti normalni stalni, niti ispitni privremeni režim rada sa rezolucijom na četiri decimalna mesta, pa je vreme provere svakog od registara aktivne električne energije pri očitaj rezoluciji 14 sati i 26 minuta. Za uobičajeno dve tarife merenja aktivne električne energije postoje dva registra energije, pa bi vreme bilo udvostručeno. Ako su, pored toga, brojila oznake A još predviđena za dvosmerne tokove merenja električne energije, ukupno vreme provere sva 4 registra aktivne energije iznosilo bi 57 sati i 44 minuta. Ovo bi predstavljalo značajno radno opterećenje za kontrolore, a i znatno bi povećavalo troškove samog kontrolisanja brojila. Pored toga nemoguće je da jedan kontrolor obavi merenje kao što je propisano u Zakonu o radu [11], tj. da u 24 sata ima najmanje 11 sati odmora neprekidno.

Zato je bitno da se razmotre mogućnosti za smanjenje dužine trajanja provere svakog od registara aktivne električne energije na brojilima oznake A klase tačnosti 0,2 S koja su „sekundarno“ podešena na tri decimalna mesta u kWh-ima.

III RELATIVNA SLUČAJNA GREŠKA ELEKTRIČNE ENERGIJE ISPITNOG IZLAZA BROJILA U ODNOSU NA ETALON BROJILO

Ispitivanje električnog brojila vrši se metodom neposrednog poređenja sa etalon brojilom električne energije. Ispitivano električno brojilo i etalon brojilo električne energije povezuju se u zajedničko električno kolo, a zatim se opterećuju odgovarajućom snagom koja odgovara tački ispitivanja (mernoj tački) brojila.

Istovremeno, odgovarajućim uređajima broje se impulsi koje stvaraju etalon brojilo i ispitivano brojilo. Relativna slučajna greška e energije ispitnog izlaza brojila u odnosu na energiju etalon brojila, bez uračunavanja proširene merne nesigurnosti mernog sistema (koja je opisana u sledećem poglavlju IV), za svako merenje iznosi:

$$e = \frac{E_b - E_e}{E_e} = \frac{K_b \cdot N_b - K_e \cdot N_e}{K_e \cdot N_e} \quad (1)$$

gde su:

E_e – električna energija koja se meri etalon brojilom;

E_b – električna energija koja se meri ispitivanim brojilom preko njegovog ispitnog izlaza;

K_e – merna konstanta etalon brojila;

K_b – merna konstanta ispitivanog brojila;

N_e – broj impulsa sa etalon brojila;

N_b – broj impulsa sa (ispitnog izlaza) ispitivanog brojila.

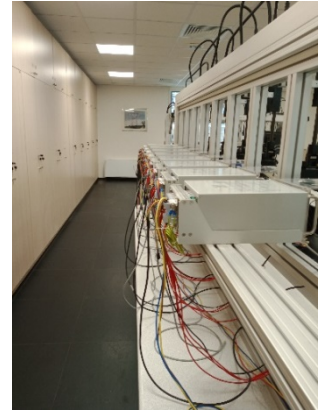
Na trofaznoj automatskoj ispitnoj stanici za brojila više redno povezanih električnih brojila može da bude ispitano istovremeno, ukoliko imaju iste sledeće osobine: 1) broj faza, 2) naznačeni napon, 3) naznačenu struju, 4) maksimalnu struju, 5) klasu tačnosti i 6) vrstu sprege.

Na slici 2. prikazana je ispitna stanica za proveru brojila u Kontrolnom telu u EMS AD sa priključenih: a) 7 brojila oznake B (serije 3, sa plavim kućištem) i jednim brojilom oznake A i b) 8 brojila oznake C. Na primeru sa slike 2a) jasno je da vreme jednovremene provere izabranog registra aktivne energije, u svakom od 8 električnih brojila u ispitivanom nizu, mora da se prilagodi najdužem vremenu ispitivanja koje je potrebno za osmo

brojilo oznake A, koje nema mogućnost rada na 4 decimalna mesta ni u jednom režimu. Uostalom, brojilo oznake A je priključeno u istom nizu sa 7 brojila oznake B, zbog uštede ukupnog vremena svih potrebnih ispitivanja radi overavanja ovih 8 brojila [10].



a)

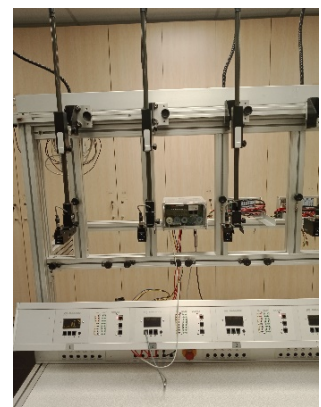


b)

Slika 2. Ispitna stanica za istovremeno ispitivanje električnih brojila u Kontrolnom telu u EMS AD, sa montiranih: a) 7 brojila oznake B i 1 brojilom oznake A (označenim crvenim krugom) i b) 8 brojila oznake C

IV ANALIZA ISPUNJENOSTI USLOVA ZA PROŠIRENU MERNU NESIGURNOST MERNOG SISTEMA ZA KONTROLU BROJILA

Merni sistem čine etalon brojilo i ostala merna oprema za pregled brojila. Merna nesigurnost je nenegativan parametar rezultata merenja kojim se opisuje njegova tačnost. Drugim rečima, to je pokazatelj rasipanja vrednosti koje bi mogle razumno da se pripisuju merenoj veličini.



Slika 3. Pomoćno visoko precizno brojilo oznake C na ispitnoj stanici u Kontrolnom telu u EMS AD, korišćeno u ogledu radenom radi izračunavanja proširene merne nesigurnosti mernog sistema

Pri ogledu utvrđivanja proširene merne nesigurnosti mernog sistema za pregled brojila, na slici 3. prikazano je korišćeno pomoćno visoko precizno brojilo oznake C: klase tačnosti aktivne energije 0,2 S, naznačene struje 1 A, maksimalne struje 2 A, naznačenog faznog napona 57,74 V, merne konstante 50000 imp/kWh, proizvedeno 2004. godine.

Relativna greška merenja električne energije, usled mernog sistema za kontrolisanje brojila, μ (%), iz N merenja, je:

$$\mu = \pm(u_A + u_{B1} + u_{B2} + u_{B3}) \quad (2)$$

gde su:

u_A – merna nesigurnost tipa A usled ponavljanja merenja, u procentima (%), za normalnu (Gausovu) raspodelu i broj stepeni slobode $\gamma_A = N - 1$ (gde je N broj merenja);

u_{B1} – merna nesigurnost tipa B usled greške radnog etalona, u procentima (%), za pravougaonu (uniformnu, ravnomernu) raspodelu i beskonačan broj stepeni slobode ($\gamma_{B1} \rightarrow \infty$). Ona se dobija deljenjem greške b_e (%), koju je posebno naznačio proizvođač za radni etalon, sa $\sqrt{3}$;

u_{B2} – merna nesigurnost tipa B usled baždarenja radnog etalona, u procentima (%), za normalnu (Gausovu) raspodelu verovatnoće i broj stepeni slobode $\gamma_{B2} = 50$. Ona se dobija deljenjem vrednosti merne nesigurnosti baždarenja radnog etalona, g_e (%), koja je data u uverenju o njegovom etaloniranju, sa 2;

u_{B3} – merna nesigurnost tipa B usled ograničene rezolucije radnog etalona, u procentima (%), za pravougaonu raspodelu verovatnoće i beskonačan broj stepeni slobode ($\gamma_{B3} \rightarrow \infty$). Ona se dobija deljenjem izračunate rezolucije r_e (%) sa $2\sqrt{3}$.

Standardna merna nesigurnost tipa A usled niza od N ponovljenih merenja ((eksperimentalna) standardna devijacija aritmetičke sredine) je:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{N}} = \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(e_i - \bar{e})^2}{N(N-1)}} \quad (3)$$

gde su:

s – standardno odstupanje (devijacija) u uzorku (skupu od N izmerenih vrednosti relativnih slučajnih grešaka);

$\bar{e}$ – aritmetička sredina uzorka;

e_i – i -ta izmerena vrednost relativne slučajne greške energije;

N – broj ponovljenih merenja.

Prema obrascu (1), izmerena vrednost i -te relativne slučajne greške električne energije, e_i , je:

$$e_i = \frac{E_{bi} - E_{ei}}{E_{ei}} \quad (4)$$

gde su:

i – i -to merenje ($i = 1, \dots, N$);

E_{ei} – i -ta električna energija koja se meri sa etalon brojilom;

E_{bi} – i -ta električna energija koja se meri sa pomoćnim, visoko preciznim brojilom preko njegovog ispitnog izlaza.

Na slici 4. prikazan je zajednički orman za napojnu jedinicu merne (ispitne) stanice i etalon brojilo. Pri proceni relativne greške mernog sistema za pregled brojila, podaci za radno etalon brojilo bili su: klasa tačnosti za aktivnu energiju b_e (%) = 0,02, merna nesigurnost baždarenja g_e (%) = 0,01 i izračunata rezolucija r_e (%) = 0,01.

Proširena merna nesigurnost mernog sistema za proveru brojila se dobija iz jednačine:

$$u_{m,p} = k \cdot u_{m,c} = k \cdot \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} \quad (5)$$

gde su:

k – koeficijent proširenja kome odgovara statistička sigurnost od 95%, a određuje se preko broja efektivnih stepeni slobode i Studentove raspodele. Pri ovom ogledu je bilo utvrđeno da je k bilo 1,96, pri svim zadatim mernim (ispitnim) tačkama;

$u_{m,c}$ – kombinovana merna nesigurnost.



Slika 4. Zajednički orman za napojnu jedinicu ispitne stanice i etalon brojilo klase tačnosti 0,02 za aktivnu električnu energiju u Kontrolnom telu u EMS AD

Iako kombinovana merna nesigurnost $u_{m,c}$ može univerzalno da se koristi za izražavanje nesigurnosti rezultata merenja, sa proširenom mernom nesigurnošću $u_{m,p}$ definiše se interval oko rezultata merenja, za koji može da se očekuje da se njime obuhvati veliki deo raspodele vrednosti koje bi razumno mogle da se pripišu merenoj veličini.

Tabela 1. Podaci za merne tačke i odgovarajuće najveće dozvoljene greške brojila, u poslednjoj koloni tabele, radi procene proširene merne nesigurnosti mernog sistema za ispitivanje električnih brojila.

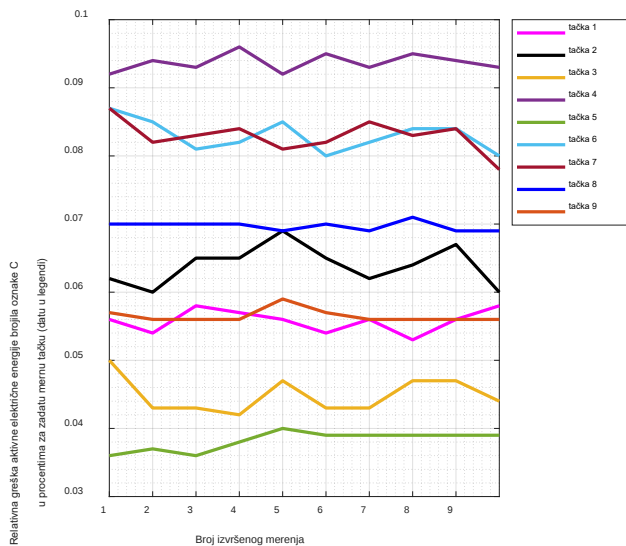
Broj merenja	Napon [V]	Struja [A]	Faktor snage	Brojevi faza	Najveća dozvoljena greška [%]
1	57,74	1	$\cos\varphi=1$	1,2,3	0,2
2	57,74	2	$\cos\varphi=0,8C$	1,2,3	0,3
3	57,74	1	$\cos\varphi=0,25L$	1,2,3	0,5
4	57,74	2	$\cos\varphi=0,5L$	1	0,4
5	57,74	1	$\cos\varphi=1$	3	0,3
6	57,74	-2	$\cos\varphi=1$	2	0,3
7	57,74	-2	$\cos\varphi=0,5L$	1,2,3	0,3
8	57,74	-0,5	$\cos\varphi=0,5L$	1,2,3	0,3
9	57,74	1	$\cos\varphi=0,5C$	1,2,3	0,5

Prema pravilniku o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S potrebno je da etalon brojilo i merna oprema, koji čine merni sistem za pregled brojila, imaju odgovarajuću tačnost tako da proširena merna nesigurnost mernog sistema bude najmanje tri puta manja od najveće dozvoljene greške brojila

[10]. Ispunjenost ovog uslova je proveravana za različite merne tačke za pomoćno visoko precizno brojilo oznake C i one su prikazane u tabeli 1., a predstavljaju kombinacije različitih: veličina zadatih struja, faktora (aktivne) snage i broja faza.

U drugoj koloni tabele 1. dat je uvek isti naznačeni fazni napon $100/\sqrt{3}$ V, a u poslednjoj koloni data je odgovarajuća najveća dozvoljena greška brojila za svaku mernu tačku posebno.

Za svaku mernu tačku izvršeno je po $N = 10$ merenja relativne slučajne greške električne energije. Na slici 5. prikazane su krive promena relativnih slučajnih grešaka aktivne električne energije ispitnog izlaza pomoćnog visoko preciznog brojila oznake C, za svaku ispitnu tačku, u zavisnosti od 10 merenja.

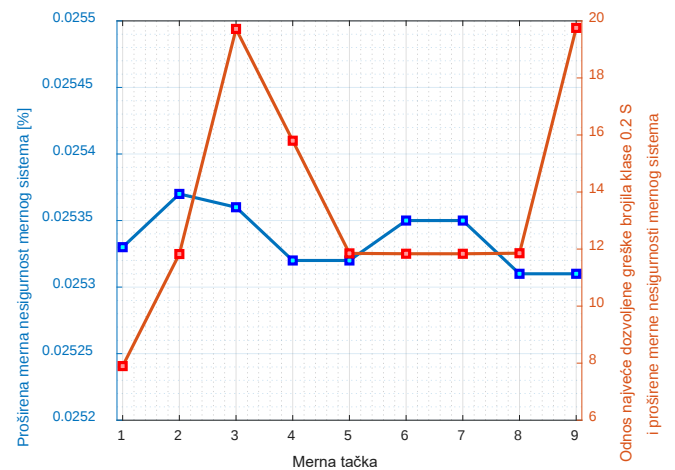


Slika 5. Krive promena relativnih slučajnih grešaka merenja aktivne električne energije sa pomoćnim visoko preciznim brojilom oznake C, pri 10 merenja, za svaku od 9 mernih tačaka

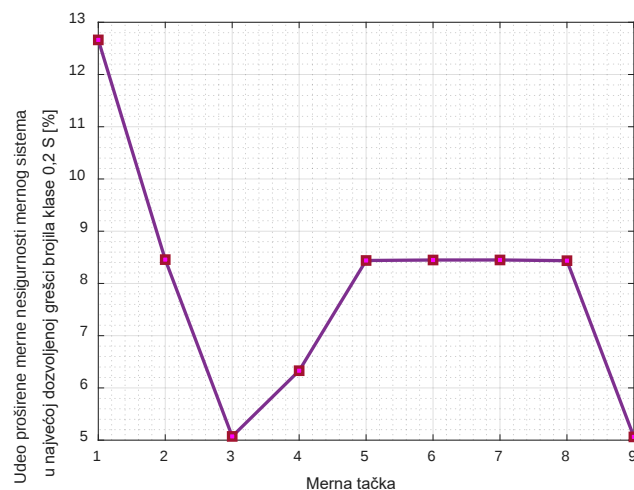
Na slici 5. primećuju se veoma mala kolebanja relativne slučajne greške energije za svaku od 9 ispitnih tačaka. Za merne tačke 3 i 9, pri $\cos\varphi=0,25L$ (induktivno) i $\cos\varphi=0,5C$ (kapacitivno), za struju 1 A i uključene sve tri faze, krive promena relativnih slučajnih grešaka aktivne električne energije za 10 merenja su ispod 5 odgovarajućih krivih za merne tačke 4, 6, 7, 8 i 2. Pri tome, kriva za $\cos\varphi=0,25L$ (tj. mernu tačku 3) je još i ispod krivih za merne tačke 1 i 9. Ovo znači da merne tačke 3 i 9 nisu kritične s obzirom na izmerene relativne slučajne greške aktivne električne energije sa ispitnog izlaza, posebno merna tačka 3, a pokazaće se na slici 6. da nisu kritične ni pri merenju proširene merne nesigurnosti mernog sistema za kontrolisanje brojila.

Na slici 6. prikazana je: a) plava kriva promene proširene merne nesigurnosti analiziranog mernog sistema za proveru brojila i b) narandžasta kriva promene odnosa najveće dozvoljene greške brojila klase tačnosti 0,2 S i proširene merne nesigurnosti mernog sistema u zavisnosti od ispitne (merne) tačke. Sa plave krive, na slici 6., vidi se vrlo malo kolebanje vrednosti proširene merne nesigurnosti za izabranih 9 mernih tačaka, u opsegu $[0,02531 - 0,02537]$ %. Sa narandžaste krive se vidi da je, u najboljim slučajevima, za merne tačke 3 i 9, pri $\cos\varphi=0,25L$ i $\cos\varphi=0,5C$,

za struju 1 A i uključene sve tri faze, odnos odgovarajuće najveće dozvoljene greške brojila klase tačnosti 0,2 S i proširene merne nesigurnosti analiziranog mernog sistema izrazito najveći, oko 19,7. To je posledica većih najvećih dozvoljenih grešaka brojila, 0,5 %, za te merne tačke. Isto tako primećuje se da je, u najnepovoljnijem slučaju, za mernu tačku 1, pri $\cos\varphi=1$, za struju 1 A i uključene sve tri faze, odnos odgovarajuće najveće dozvoljene greške brojila klase 0,2 S i proširene merne nesigurnosti mernog sistema, izrazito najmanji, tj. 7,9. To je posledica najmanje dozvoljene greške brojila, 0,2 %, za tu mernu tačku. Za $\cos\varphi=1$ i uključene sve tri faze, obično se vrši i provera registra aktivne električne energije brojila, što će da bude objašnjeno u sledećem poglavlju V.



Slika 6. a) Plava kriva promene proširene merne nesigurnosti mernog sistema i b) narandžasta kriva promene odnosa najveće dozvoljene greške brojila klase tačnosti 0,2 S i proširene merne nesigurnosti mernog sistema u zavisnosti od ispitne tačke



Slika 7. Udeo proširene merne nesigurnosti analiziranog mernog sistema u najvećoj dozvoljenoj grešci brojila klase tačnosti 0,2 S u zavisnosti od izabrane merne tačke

Ove vrednosti proširenih mernih nesigurnosti za pojedine merne tačke sa plavog grafika na slici 6. mogu da se koriste za

popravku („kompenzaciju“) ustanovljenih ukupnih relativnih grešaka očitavanja registara električne energije pri ispitivanju brojila (objašnjenih u poglavlju VI), jer predstavljaju odgovarajuće pretežno sistematske greške merne opreme za proveru brojila za svaku izabranu mernu tačku posebno.

Na slici 7. prikazan je udeo proširene merne nesigurnosti analiziranog mernog sistema za kontrolu brojila u najvećoj dozvoljenoj grešci brojila klase tačnosti 0,2 S u zavisnosti od izabrane merne tačke. Primećuje se da je, u najnepovoljnijem slučaju, za mernu tačku 1, pri $\cos\varphi=1$, za struju 1 A i uključene sve tri faze, proširena merna nesigurnost analiziranog mernog sistema za ispitivanje brojila daleko manja od dozvoljenih 33,3 % najveće dozvoljene greške brojila klase 0,2 S od 0,2 % za tu mernu tačku i iznosi svega 12,7 % od nje. U najpovoljnijem slučaju, za merne tačke 3 i 9 pri $\cos\varphi=0,25L$ i $\cos\varphi=0,5C$, za struju 1 A i uključene sve tri faze, proširena merna nesigurnost analiziranog mernog sistema za ispitivanje brojila je svega oko 5,1 % najveće dozvoljene greške brojila klase tačnosti 0,2 S od 0,5 % za te merne tačke.

V ANALIZA ISPUNJENOSTI USLOVA ZA PROVERU REGISTARA AKTIVNE ELEKTRIČNE ENERGIJE BROJILA

Prema Međunarodnoj preporuci OIML R 46-1/-2 iz 2012 god. [12], a odatle preuzeto i u važećem Pravilniku o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 [10], zadata je jednačina za najmanju aktivnu električnu energiju $E_{b,min}$, izraženu u vat-časovima, koja je potrebna da se propusti kroz brojilo za proveru registra aktivne energije:

$$E_{b,min} = \frac{1000 \cdot R [Wh]}{b [\%]} \quad (6)$$

gde su:

R – očigledna rezolucija registra aktivne energije koja se pojavljuje na ekranu brojila, izražena u Wh,

b – najveća dozvoljena greška brojila za izabranu mernu tačku.

Bilo koji način može da se koristi za poboljšanje očigledne rezolucije osnovnog registra energije R , sve dok se vodi računa o tome da se obezbedi da rezultati odražavaju pravu rezoluciju osnovnog registra energije.

Energija koja se propušta kroz brojilo se proračunava korišćenjem broja impulsa sa ispitnog izlaza (davača). Treba da se odredi relativna razlika između ove energije E_b i registrovane energije E_r u brojilu. Ova relativna razlika ne sme da bude veća od jedne desetine (odnosno od 10 %) najveće dozvoljene greške brojila pri naznačenim uslovima rada. Ispitivanje može da bude izvedeno sa proizvoljnom strujom $I \geq 0,05 \cdot I_n$. Ovaj uslov za proveru registra energije brojila dat je sledećom nejednačinom:

$$\frac{E_b - E_r}{E_b} \leq \frac{b}{10} = \frac{b [\%]}{1000} \Rightarrow E_b \geq \frac{1000 \cdot (E_b - E_r)}{b [\%]} \quad (7)$$

Najmanja električna energija $E_{b,min}$ koja može da se propusti kroz električno kolo, koje čine etalon brojilo i ispitivano brojilo električne energije, je:

$$E_{b,min} = \frac{1000 \cdot (E_b - E_r)}{b [\%]} = \frac{1000 \cdot R}{b [\%]} \quad (8)$$

Poređenjem jednačina (6) i (8), sledi da je:

$$E_b - E_r = R \quad (9)$$

što predstavlja rezoluciju brojila električne energije, tj. sistematsku grešku usled ograničene rezolucije električnog brojila. Ona predstavlja grešku vrednosti energije E_r koja se očitava iz registra električne energije brojila u odnosu na vrednost energije E_b koja se dobija množenjem broja impulsa N_b sa ispitnog davača i konstante brojila K_b .

Vreme trajanja provere registra električne energije, koji se prikazuje na ekranu električnog brojila, je:

$$t_r = \frac{E_{b,min}}{\sqrt{3} \cdot I \cdot U_n \cdot \cos\varphi} \quad (10)$$

gde su:

I – zadata struja brojila [A], pri čemu je $I \geq 0,05 \cdot I_n$,

U_n – naznačeni napon brojila [V],

$\cos\varphi$ – faktor snage.

Da bi se vreme trajanja provere registra smanjilo što više, bira se maksimalna struja brojila I_{max} , pri svim fazama uključenim, i $\cos\varphi = 1$, pa se zamenom (6) u (10) dobija:

$$t_{r,min} = \frac{E_{b,min}}{\sqrt{3} \cdot I_{max} \cdot U_n} = \frac{1000 \cdot R}{\sqrt{3} \cdot I_{max} \cdot U_n \cdot b [\%]} \quad (11)$$

Za primer, uzeće se brojilo oznake A, ranije prikazano na slici 1a) u poglavlju II, koje je sekundarno podešeno u kilovat satima [kWh] i na svom ekranu prikazuje merenu električnu energiju sa sekundara strujnih i naponskih mernih transformatora u postrojenju. Ovo brojilo, koje se obično koristi tako podešeno u prenosnom sistemu u Srbiji, ima mogućnost podešavanja registra energije na najviše tri decimalna mesta u radnom režimu. Nema mogućnost prebacivanja u ispitni režim radi podešavanja registra energije koji se ispituje na četiri decimalna mesta, da bi se vreme provere registra skratilo 10 puta, kao kod brojila oznaka B i C. Radi podešavanja, ovo brojilo oznake A je klase tačnosti aktivne energije 0,2 S, naznačenog faznog napona 57,74 V, naznačene struje 1 A, maksimalne struje 2 A i konstante 10000 imp/kWh.

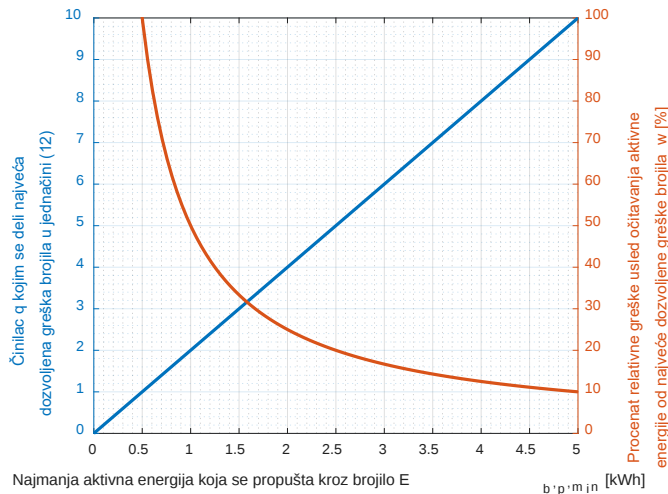
Ne razmišljajući mnogo, uzimanjem u obzir očigledne rezolucije registra energije $R = R_o = 0,001 \text{ kWh}$, pri najmanjoj energiji koja se propušta kroz brojilo od 5 kWh koja se dobija prema jednačini (6), najmanje vreme ispitivanja jednog registra aktivne električne energije iznosilo bi 14 sati i 26 minuta prema jednačini (11) (što je pomenuto i u poglavlju II). Za ispitivanje 4 registra aktivne električne energije (za dve tarife i dva smera energije), najmanje ukupno vreme ispitivanja iznosilo bi 57 h i 44 minuta.

U nejednačini (7), ako bi se pretpostavilo da je relativna razlika između energije dobijene sa impulsnog davača E_b i registrovane energije u brojilu E_r manja od najveće dozvoljene greške brojila pri naznačenim uslovima, ne 10 puta, nego proizvoljan broj q puta, dobila bi se umesto jednačine (8), jednačina (12):

$$E_{b,p,min} = \frac{100 \cdot R [Wh]}{\frac{b [\%]}{q}} = \frac{10000 \cdot R [Wh]}{w [\%] \cdot b [\%]} \quad (12)$$

gde je $w[\%] = 100/q$ procentualni iznos relativne sistematske greške usled očitavanja energije iz registra brojila od najveće dozvoljene greške brojila.

Pri očitaj rezoluciji R_o , za brojilo oznake A (sa podacima u trećem pasusu na ovoj strani poglavlja V), na slici 8. prikazan je plavom krivom činilac q , kojim se deli najveća dozvoljena greška brojila u jednačini (12), a crvenom krivom procentualni udeo relativne sistematske greške usled očitavanja registra aktivne energije brojila u najvećoj dozvoljenoj grešci brojila $w[\%]$, u zavisnosti od najmanje aktivne energije koja se propušta kroz brojilo $E_{b,p,min}$.



Slika 8. a) Činilac q kojim se deli najveća dozvoljena greška brojila u jednačini (12) i b) procenat relativne sistematske greške usled očitavanja energije iz registra u njoj $w[\%]$, u zavisnosti od najmanje aktivne energije $E_{b,p,min}$ koja se propušta kroz sekundarno podešeno brojilo oznake A, za očiglednu rezoluciju registra energije na tri decimalna mesta.

Na slici 8 se vidi da je 5 kWh najmanja dopuštena aktivna energija koja se propušta kroz brojilo, kada se uzme u obzir očigledna (očita, golim okom vidljiva) rezolucija registra energije sa ekrana brojila. Pri tome je $q = 10$ činilac kojim se deli najveća dozvoljena greška brojila u jednačini (12) i $w = 10\%$ udeo relativne sistematske greške usled očitavanja aktivne električne energije iz registra brojila u odnosu na najveću dozvoljenu grešku brojila.

Najmanje vreme provere registra aktivne energije $t_{r,min}$, pri očiglednoj rezoluciji registra R_o na tri decimalna mesta, je linearno srazmerno sa q , slično kao i najmanja dopuštena aktivna energija izmerena brojiлом $E_{b,p,min}$ na slici 8a), pa taj grafik koji bi bio istog oblika nije nacrtan.

Kada se bolje razmisli, pokazuje se da nije uvek opravdana primena jednačine (11) uz uzimanje u obzir očigledne rezolucije registra brojila koja se vidi na samom ekranu brojila R_o , pošto rezolucija registra brojila R zavisi i od merne konstante brojila, tj. od stvarne unutrašnje rezolucije brojila koja, kada se zaokruži na očiglednu rezoluciju brojila, predstavlja pravu rezoluciju brojila.

Uzimanje u obzir očigledne (jasno vidljive) rezolucije registra R_o , na tri decimalna mesta sa ekrana brojila, opravdano je ako je konstanta brojila 1000 imp/kWh, kao kod brojila za domaćinstva. Za tu konstantu od 1000 imp/kWh, brojila oznake A prave se za direktnu vezu, klasu tačnosti 1, naznačenu struju 5 A, maksimalnu struju 120 A i naznačeni fazni napon 230 V. „Najmanje“ vreme provere registra aktivne energije takvog brojila je malo, jer je 1195 puta kraće od 14 sati i 26 minuta, koliko bi trajalo najmanje vreme provere registra aktivne energije brojila oznake A sa konstantom brojila 10000 imp/kWh, klasom tačnosti 0,2 S, naznačenim faznim naponom 57,74 V i maksimalnom strujom 2 A, koje se koristi u postrojenjima u Srbiji za napone 110 kV i više.

V.1 Prava rezolucija registra električne energije i mogućnost za smanjenje vremena provere registra aktivne električne energije brojila dva puta

Digitalnim uređajima kojima se zaokružuju merene vrednosti (npr. multimetrima), uzimaju se uzorci neprekidnog ulaznog signala i koriste se registri kojima se broji, usrednjava i zaokružuje najmanje značajna, prikazana cifra [13]. U većini uređaja, najmanja značajna cifra se zaokružuje nagore ili naniže korišćenjem konvencionalnog zaokruživanja. Kada merni uređaji, kao npr. brojila električne energije, rade na ovaj način, prihvatljivo je da se sistematska greška usled ograničene rezolucije registra energije brojila Δe_r smatra polovinom najmanje značajne cifre u registru energije brojila. Drugim rečima, prava rezolucija registra energije brojila R_p bila bi jednaka polovini očigledne rezolucije registra energije brojila R_o :

$$R = \Delta e_r = R_p = \frac{R_o}{2} \quad (13)$$

U praksi u Srbiji, u postrojenjima za 110 kV i više, brojila u vlasništvu EMS AD su klase tačnosti 0,2 S, sa unutrašnjom konstantom $K_b \geq 10000 \text{ imp./kWh}$.

Za unutrašnju konstantu električnog brojila od 10000 imp/kWh (tj. 10 puta veću od 1000 imp/kWh), unutrašnja rezolucija tog brojila je 0,0001 kWh (tj. 10 puta tačnija od očigledne rezolucije registra brojila R_o na tri decimalna mesta). Za takvo brojilo je potpuno opravdano da se primeni jednačina (13) za pravu rezoluciju registra energije brojila R_p . Tada bi vreme provere svakog od registara aktivne električne energije pominjanog brojila oznake A iz poglavlja II i V bilo duplo manje, tj. po 7 sati i 13 minuta.

Procentualni udeo w relativne sistematske greške usled očitavanja energije iz registra energije brojila na njegovom ekranu u odnosu na najveću dozvoljenu grešku brojila bio bi opet 10 %, jer je prava rezolucija registra energije brojila R_p sada dva puta manja nego u slučaju na slici 8b) kada je uzeta u obzir očigledna rezolucija registra energije brojila R_o . Dakle, promenilo se R u jednačini (12), ali ne i činilac q . Kao rezultat toga, duplo je manja zadata najmanja vrednost aktivne električne energije koja se meri brojiлом $E_{b,p,min}$, tj. iznosi 2,5 kWh, jer se relativna greška između zadate energije koja se meri brojiлом E_b i energije koja se očitava sa brojila (iz registra energije) E_r povećala na 1/5 granice najveće dozvoljene greške brojila u nejednačini (7).

VI UKUPNA RELATIVNA GREŠKA OČITAVANJA REGISTRA AKTIVNE ELEKTRIČNE ENERGIJE ISPITIVANOG BROJILA

Pri proveru registra aktivne električne energije brojila, utvrđuje se da li je ukupna relativna greška očitavanja registra energije ispitivanog brojila manja od najmanje dozvoljene greške brojila. Ukupna relativna greška energije dobijene očitavanjem registra izmerene energije brojila E_r , u odnosu na energiju izmerenu etalon brojilom E_e , za svako merenje, računa se prema obrascu:

$$\gamma = \frac{E_r - E_e}{E_e} = \pm \left(|e| + \left| \frac{\Delta e_r}{E_e} \right| + u_{m,p} \right) = \pm \left(|e| + \left| \frac{s \cdot R}{E_e} \right| + u_{m,p} \right) \quad (14)$$

gde su:

- e – relativna slučajna greška energije izmerene preko ispitnog izlaza brojila u odnosu na energiju izmerenu etalon brojilom, za 1 merenje (videti poglavlje III),
- E_r – vrednost energije očitane iz registra ispitivanog brojila, koji se prikazuje na njegovom ekranu,
- E_e – električna energija koja se meri etalon brojilom,
- Δe_r – sistematska (instrumentalna) greška usled ograničene rezolucije registra energije na ekranu brojila,
- R – vrednost poslednje cifre (tj. rezolucija) registra energije na ekranu brojila (tj. najmanja električna energija na ekranu brojila za zadatu vidljivu rezoluciju registra energije) ili tzv. očigledna rezolucija registra energije,
- s – sačinilac kojim se množi R (može da bude 1 ili $\frac{1}{2}$, zavisno od unutrašnje rezolucije brojila, videti jednačinu (13) i propratno objašnjenje u odeljku V.1),
- $u_{m,p}$ – proširena merna nesigurnost mernog sistema za kontrolisanje električnih brojila, za datu mernu tačku (videti poglavlje IV).

Radi podsećanja, u sistematskoj grešci usled ograničene rezolucije registra energije brojila Δe_r , kada je $s=1$ radi se o očiglednoj (golim okom vidljivoj) rezoluciji registra energije brojila R_o , a kada je $s=1/2$ radi se o pravoj rezoluciji registra energije brojila R_p , kojom se uzima u obzir unutrašnja rezolucija brojila u slučaju da je veća od očigledne rezolucije registra brojila bar 2 puta [6].

VI.1 Mogućnost za smanjenje vremena provere registra aktivne električne energije brojila dva i po puta

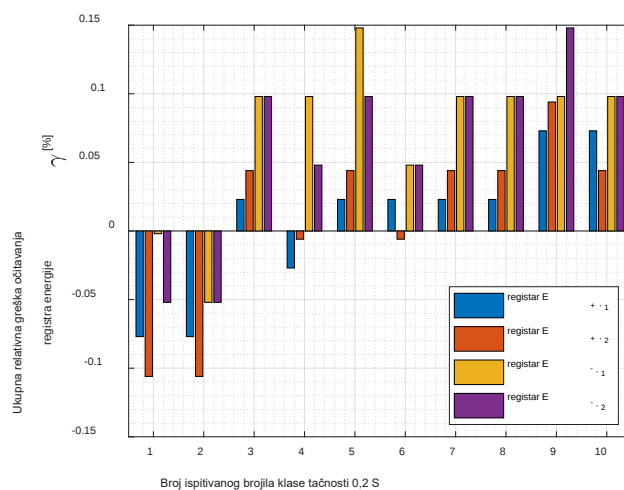
U Češkoj Republici, stalnoj članici OIML-a i Evropske unije, važe „Opšte mere koje se tiču metroloških i tehničkih zahteva za zakonski kontrolisane merne instrumente uključujući metode ispitivanja za potvrdu tipa i verifikaciju zakonski kontrolisanih mernih instrumenata: električna brojila“, broj 0111-OOP-C022-18, koje su stupile na snagu 28.3.2019. god. [14]. U tom propisu se takođe predlaže primena jednačine (6) za proveru registra energije brojila, ali uz napomenu da se u slučaju brojila aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S, relativna greška između zadate energije koja se meri brojilom E_b i energije koja se očitava sa brojila E_r povećava na $1/4$ granice najveće dozvoljene greške brojila u nejednačini (7). Po ovom propisu, vreme ispitivanja registara aktivne električne energije iznosi po 5 sati i 47 minuta kod brojila oznake A, klase tačnosti 0,2 S, sa „sekundarnim“ podešenjem na tri decimalna mesta u kWh-ima,

za konstantu brojila od 10000 imp./kWh, naznačenu struju 1 A, maksimalnu struju 2 A i naznačeni fazni napon 57,74 V.

Procentualni udeo w relativne sistematske greške usled očitavanja aktivne energije iz registra energije brojila na njegovom ekranu u odnosu na najveću dozvoljenu grešku brojila bio bi sada 12,5 %, pri čemu je uzeta prava rezolucija registra energije brojila R_p koja je dva puta manja nego u slučaju na slici 8 kada je uzeta u obzir očigledna rezolucija registra energije brojila R_o . Dakle, promenilo se R u jednačini (12), ali se promenio i činilac q sa 10 na 8. Kao rezultat toga, 2,5 puta je manja zadata najmanja vrednost aktivne električne energije koja se meri brojilom $E_{b,p,min}$, tj. iznosi 2 kWh, jer se relativna greška između zadate energije koja se meri brojilom E_b i energije koja se očitava sa brojila (iz registra energije) E_r povećala na $1/4$ granice najveće dozvoljene greške brojila u nejednačini (7).

Dokazano je u poglavlju IV da proširena merna nesigurnost ispitivanog mernog sistema u ovom radu, za izabrane merne tačke za aktivnu električnu energiju, ne prelazi 12,7 % najveće dozvoljene greške brojila. To je 20,6 % manje od uslova za proširenu mernu nesigurnost mernog sistema (od 33,3 % najveće dozvoljene greške brojila), pa je moguće i dodatno da se smanji vreme provere registra aktivne energije sa dva puta (kao što je opisano u odeljku V.1) na dva i po puta, u odnosu na vreme koje bi se dobilo jednačinom (11) kada bi se u nju uvrstila očigledna rezolucija registra aktivne energije brojila R_o .

Za 10 brojila oznake A, klase tačnosti 0,2 S, koja su zajedno kontrolisana na istoj ispitnoj stanici, a overena 14.6.2022. godine, naznačenih podataka pomenutih u trećem pasusu ovog odeljka VI.1, na slici 9. date su ukupne relativne greške očitavanja registara aktivne energije ovih ispitivanih brojila, od kojih su dva brojila proizvedena 2020. godine, a preostalih osam 2004. godine. Ukupne relativne greške očitavanja registara aktivne energije ovih 10 brojila oznake A date su za 4 registra aktivne električne energije za dva smera energije, pozitivni (+) i negativni (-), i za po dve tarife (1 i 2).



Slika 9. Ukupne relativne greške očitavanja registara aktivne električne energije za 10 ispitivanih brojila oznake A, za po 4 registra energije, za 2 smera aktivne energije (pozitivan i negativan) i dve tarife (prvu i drugu)

Sa slike 9. vidi se da su sve ukupne relativne greške očitavanja četiri registra aktivne energije svakog od ovih 10 brojila u granicama najveće dozvoljene greške brojila. To opravdava smanjenje vremena provere registara aktivne električne energije brojila oznake A za 2,5 puta, u odnosu na vreme koje je bi se dobilo jednačinom (11) kada bi se u nju uvrstila očigledna rezolucija registra aktivne energije brojila R_o .

VII ZAKLJUČAK

Cilj ovog članka bio je da se prvo analizira ispunjenost uslova za proširenu mernu nesigurnost mernog sistema za ispitivanje brojila i utvrde najpovoljnije merne tačke i najnepovoljnija merna tačka. Drugo, da se analizira uslov za proveru registra aktivne električne energije brojila u smislu minimiziranja ukupnog vremena ispitivanja brojila radi overe, i to pre svega brojila oznake A, koja su opisana u II poglavlju, klase tačnosti 0,2 S, „sekundarno“ podešena sa rezolucijom na tri decimalna mesta u kWh-ima i koja se dosta koriste za merenje električne energije u prenosnom sistemu u Srbiji. Na kraju, da se razmotri da li bi prvi uslov mogao da bude olakšavajuća okolnost za ublažavanje zahteva zadatog drugim uslovom.

Iz izvršenog oglada je jasno da je proširena merna nesigurnost mernog sistema za ispitivanje brojila prilično ujednačena za različite tačke merenja aktivne električne energije, a najveća apsolutna razlika je tek $6 \cdot 10^{-5} \%$, što predstavlja relativnu razliku od svega 0,24 %. Tako ova proširena merna nesigurnost mernog sistema može približno da se smatra sistematskom greškom i da posluži da se, za svaku mernu tačku, popravi ukupna relativna greška očitane energije brojila pri merenju mernim sistemom za kontrolu brojila. Time bi se, za svaku mernu tačku, dobila prava relativna greška u električnoj energiji koja se dobija očitavanjem registra energije sa brojila.

Za merne tačke 3 i 9, koje se na poseban zahtev korisnika brojila ispituju za svrhu overavanja brojila, pri $\cos\varphi=0,25$ i $\cos\varphi=0,5$ C, struji 1 A i uključene sve tri faze, pokazalo se da je odnos odgovarajuće najveće dozvoljene greške brojila i proširene merne nesigurnosti mernog sistema najveći, oko 19,72. Drugim rečima, uslov za proširenu mernu nesigurnost mernog sistema za kontrolu brojila je tada najbolje ispunjen. 5,1 % je proširena merna nesigurnost mernog sistema u odnosu na najveću dozvoljenu grešku brojila, koja je za te merne tačke najveća tj. 0,5 %.

S druge strane, za ove merne tačke 3 i 9, čak ni krive promena relativnih slučajnih grešaka izmerene aktivne električne energije pomoćnim brojiлом oznake C za 10 merenja nisu kritične, jer se nalaze ispod odgovarajućih krivih za čak 5 drugih mernih tačaka.

Za mernu tačku 1, pri $\cos\varphi=1$, za struju 1 A i uključene sve tri faze, odnos odgovarajuće najveće dozvoljene greške energije brojila i proširene merne nesigurnosti mernog sistema je najnepovoljniji, izrazito je najmanji, tj. 7,9, jer je zahtevana najveća dozvoljena greška brojila za tu mernu tačku najmanja, tj. 0,2 %. Međutim, proširena merna nesigurnost analiziranog mernog sistema za ispitivanje brojila je i za ovu kritičnu mernu tačku 1 daleko manja od dozvoljenih 33,3 % najveće dozvoljene greške brojila i iznosi svega 12,7 % od nje (2,62 puta manje).

Provera registra aktivne električne energije brojila se obično vrši

pri $\cos\varphi=1$ i uključene sve tri faze, jer je tada vreme ovog ispitivanja najmanje. Dakle, za proveru registra aktivne energije brojila merna tačka 1 je najpovoljnija, za razliku od provere proširene merne nesigurnosti mernog sistema gde je merna tačka 1 bila najnepovoljnija.

Uzimajući u obzir unutrašnju rezoluciju brojila, njenim zaokruživanjem na poslednju cifru registra aktivne energije brojila dobija se prava rezolucija registra aktivne energije R_p koja je dvostruko manja od očigledne (golim okom vidljive) rezolucije registra aktivne energije brojila na njegovom ekranu R_o . Ovo je opravdano za brojila električne energije u prenosnom sistemu u Srbiji, za napone 110 kV i više, čija je unutrašnja konstanta brojila $K_b \geq 10000$ imp./kWh. Na taj način se vreme ispitivanja 4 registra aktivne električne energije, za dva smera energije i dve tarife, smanjuje sa 57 sati i 44 minuta na 28 sati i 52 minuta, za brojilo oznake A, sa „sekundarnim“ podešenjem na tri decimalna mesta u kWh-ima, klase tačnosti 0,2 S, za konstantu brojila od 10000 imp./kWh, naznačenu struju 1 A, maksimalnu struju 2 A i naznačeni fazni napon 57,74 V.

S druge strane, uzimajući u obzir pravu rezoluciju registra aktivne električne energije brojila R_p i češki pravilnik [14], prema kome treba da se smanji vreme provere registra aktivne energije 2,5 puta za brojila klase tačnosti 0,2 S, procentualni udeo w relativne sistematske greške usled očitavanja aktivne energije iz registra energije brojila na njegovom ekranu u odnosu na najveću dozvoljenu grešku brojila povećao bi se sa 10 % na 12,5 %. Na taj način moguće je i dodatno da se smanji vreme provere registara aktivne energije brojila, sa dva puta (tj. za 50 %) na dva i po puta (tj. za 60 %), u odnosu na vreme koje je bi se dobilo jednačinom (11) kada bi se u nju uvrstila očigledna rezolucija registra aktivne energije brojila R_o .

Ovo dodatno povećanje procentualnog udela w relativne sistematske greške usled očitavanja aktivne energije iz registra energije brojila u odnosu na najveću dozvoljenu grešku brojila od svega 2,5 % (sa polaznih 10 % na 12,5 % prema jednačini (12)) je sasvim prihvatljivo iz sledećih razloga:

- 1) Prvi uslov za proširenu mernu nesigurnost mernog sistema za kontrolisanje brojila ne obuhvata relativnu sistematsku grešku usled ograničene rezolucije registra aktivne energije kontrolisanog brojila. Međutim, ovaj uslov može indirektno da bude olakšavajuća okolnost, uzimajući u obzir da je drugi uslov za proveru registra aktivne energije brojila osmišljen da na kraju ukupna relativna greška očitavanja aktivne energije iz registra brojila ne prelazi najveću dozvoljenu grešku brojila. Ovo proizilazi iz toga što proširena merna nesigurnost mernog sistema analiziranog u ovom radu nije prelazila 12,7% najveće dozvoljene greške brojila za razne merne tačke, što je za 20,6 % manje od najvećeg uslova za proširenu mernu nesigurnost mernog sistema, kojim je dozvoljeno odstupanje do 33,3 % najveće dozvoljene greške brojila. Uzimajući ovo u obzir, dodatnih 2,5 % merne nesigurnosti zbog relativne sistematske greške usled očitavanja aktivne energije iz registra energije brojila ne predstavlja problem pri određivanju ukupne relativne greške očitavanja registra aktivne energije ispitivanog brojila, što je dodatno dalje obrazloženo u tački 2) ispod.

2) Za brojila oznake A, čije je vreme provere registara aktivne električne energije predugo uzimajući u obzir samo očiglednu rezoluciju tih registara R_o , pokazalo se i iz iskustava u praksi, čiji su rezultati izneti u ovom radu sa jednog od kontrolisanja brojila radi overe, da je smanjenje vremena njihove provere za 2,5 puta opravdano, jer su ukupne relativne greške očitavanja registara aktivne energije tih brojila bile u granicama najveće dozvoljene greške brojila. Na taj način se vreme ispitivanja 4 registra aktivne električne energije, za dva smeru energije i dve tarife, smanjuje sa 57 sati i 44 minuta na 23 sata i 6 minuta, za brojilo oznake A, sa „sekundarnim“ podešenjem na tri decimalna mesta u kWh-ima i naznačenih podataka kao u 7 pasusu ovog zaključka (tj. poglavlja VII).

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Petrović-Stojanović, J. Od 3,7 miliona brojila u Srbiji svega četiri odsto „pametnih“, Politika, 2.12.2023. <https://www.politika.rs/scc/clanak/587451/Od-3-7-miliona-brojila-u-Srbiji-svega-četiri-odsto-pametnih> [pristupljeno 15.01.2024]
- [2] Godišnji tehnički izveštaj EMS AD – 2022, 2023. <https://ems.rs/wp-content/uploads/2023/05/GTI-o-rad-u-EMS-AD-u-2022.-godini-Correct.pdf> [pristupljeno 15.01.2024]
- [3] Zakon o metrologiji, „Sl. glasnik RS“, br. 15/2016, 22 strane, 2016. <https://privreda.gov.rs/sites/default/files/documents/2021-08/Zakon-O-Metrologiji.pdf> [pristupljeno 17.01.2024]
- [4] Dukanac, Đ. Analiza vremena ispitivanja i greške očitavanja pametnih brojila električne energije u zavisnosti od njihovog podešenja, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 23, No. 1, pp. 50-55, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-1.50D>
- [5] Dukanac, Đ. Optimalno podešavanje rezolucije registra električne energije pametnog brojila, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 2, pp. 75-85, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-2.75D>
- [6] Dukanac, Đ., Mogućnosti za unapređenje kontrolisanja brojila električne energije klasa tačnosti 0,2 S i 0,5 S, in Proc. 37. Međunarodno savetovanje „ENERGETIKA 2022“, Zlatibor, Srbija, 21–24. juna 2022.
- [7] SL7000 IEC7 user guide, Itron S.A.S, France, 2010. https://www.otec.com.ua/show_catalogue_pdf/245372/1 [pristupljeno 17.01.2024]
- [8] ZMD400AT/CT, ZFD400AT/CT, E650 Series 4, User Manual, Landis+Gyr AG, Switzerland, 2017. <https://www.manualslib.com/manual/1632363/LandisPlusgyr-E650-Series-4.html#manual> [pristupljeno 17.01.2024]
- [9] ZMQ200, ZFQ200, ZCQ200, User Manual, Landis+Gyr AG, Switzerland, 2012. https://www.landisgyr.eu/webfoo/wp-content/uploads/2012/09/7102000215_en-1-ZxQ-User-Manual.pdf [pristupljeno 17.01.2024]
- [10] Pravilnik o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S „Službeni glasnik RS“, br. 104/2016). https://www.dmdm.rs/images/dokumenti/podzakonski_propisi/pravilnik_o_brojilima_aktivne_elektricne_energije_klase_tacnosti_02_s.pdf [pristupljeno 20.01.2024]
- [11] Zakon o radu. „Službeni glasnik RS“, br. 95/2018. https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_radu.html [pristupljeno 20.01.2024]
- [12] International Recommendation OIML R 46-1/-2: “Active electrical energy meters”, Part 1: Metrological and technical requirements, Part 2: Metrological controls and performance tests, 2012. https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r046-1-2-e12.pdf [pristupljeno 20.01.2024]
- [13] Harrison, D., Harlow, J. *Introduction to Uncertainty in Physical Measurements*, University of Toronto, Canada, 2015. <https://www.physics.utoronto.ca/~jharlow/teaching/phy131f15/uncertainties/Mini.pdf> [pristupljeno 18.03.2024]
- [14] Draft General Measure number: 0111-OOP-C02218 laying down the metrological and technical requirements for legally controlled measuring instruments, including test methods for type approval and verification of the following legally controlled measuring instruments: ‘electricity meters’, Czech Metrology Institute, 2019. <https://technical-regulation-information-system.ec.europa.eu/en/notification/15424> [pristupljeno 18.03.2024]

AUTOR/AUTHOR

Đorđe Dukanac – doktor elektrotehnike i računarstva, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd, djordje.dukanac@ems.rs, ORCID [0000-0002-1090-3129](https://orcid.org/0000-0002-1090-3129)

Analysis of Fulfilment of Conditions for Measurement Uncertainty of the Smart Meter Control System and Reduction of Register Check Time

Abstract – This paper examines the results of the application and the existence of a coupling between the two conditions, which are important when controlling the meter in order to possibly reduce its execution time. According to the Rulebook on meters of active electric energy of accuracy class 0.2 S, the first condition for the extended measurement uncertainty of the measuring system for controlling the meter in relation to the maximum permissible error of the meter is set. The first goal of this work is to check whether this first condition is the most critical for $\cos\varphi=0.25$ inductive or $\cos\varphi=0.5$ capacitive, which are set at the special request of the meter user. A standard of accuracy class 0.02 and an indirect connection meter of accuracy class 0.2 S for active energy were used. In the above-mentioned Rulebook and International Recommendation OIML R 46-1/-2, the second condition is set that will be analysed, for the relative difference between the energy at the test output and the energy read on the register in relation to the maximum permissible error of the meter. The second goal of this paper is to analyse whether, in terms of the justification of reducing the time of checking the meter's active energy register, the first condition can be a facilitating factor. It will further be considered whether this second condition can be relaxed for meters of accuracy class 0.2 S, considering the usual expected total relative error obtained when checking the register for active energy and the precision and accuracy of meters of that class used.

Index Terms – Measurement uncertainty, Smart meter, Electrical energy, Register check, Resolution, Accuracy class

Modified Steam-Turbine Rankine Cycle without Rejection of the Cycle Condensation Heat, Driven by a Wet-Vapor-Region Thermocompressor

Branko Stanković

Energonauts LLC, Casper, WY / Las Vegas, NV, USA

Abstract - The disclosed concept relates to a novel modified and simplified steam-turbine Rankine cycle without rejection of the cycle waste heat of condensation, which is driven by a thermocompressor (ejector) operating in the wet-vapor region. The thus modified steam-turbine Rankine cycle can theoretically achieve the maximum possible thermal efficiency (~100%). The wet-vapor mixture circulating within the thermocompressor is being separated in a dedicated cylindrical separation tank, so that the saturated water is pumped to a water heater where it receives the cycle heat input, while the saturated vapor is expanded in a backpressure steam turbine producing useful mechanical work and is then recirculated back to the thermocompressor, where it is being re-pressurized by means of the primary fluid (pumped and heated saturated water). The concept can be applied to steam-turbine-cycle power-plants fueled by: coal or solid/liquid/gaseous fuel, waste heat, nuclear fuel (used by boiling water reactors, pressurized water reactors, pressurized heavy-water reactors, gas-cooled reactors, molten salt reactors or liquid-metal-cooled fast reactors) or renewable energy sources (Solar energy, biomass, geothermal). The concept can also be applied as the “bottoming” steam-turbine-cycle part of a combined gas-turbine/steam-turbine cycle power plant.

Index Terms - Modified Rankine cycle, No rejection of cycle waste heat of condensation, Thermocompressor operating in the wet-vapor region, Maximum possible cycle thermal efficiency

I INTRODUCTION

It is a well-known fact that the simplest and the most straightforward way of decreasing concentration of the main green-house gases (GHGs) in the atmosphere (CO_2 -gas and water vapor H_2O), representing the main ingredients of flue gases resulting from combustion of fossil fuels, and also extending the use of non-renewable (fossil & nuclear) fuels, is to increase/improve the (cycle thermal) energy efficiency of thermal-to-mechanical (electrical) energy conversion for any kind of fossil or nuclear fuel used. Modern combined-cycle gas & steam turbine plants using natural gas (or other hydrocarbon fuels) reach the currently highest cycle thermal efficiency (~64% at lower heating value, LHV) of all thermal engines. In addition, new hybrid concepts have been developed with gas turbines combined with fuel cells, with claimed overall thermal efficiency near 70% (LHV). There has also been an intensive research of new ways of increasing efficiency of thermal energy conversion from coal and nuclear fuels, as worldwide electric power generation still relies considerably on the Rankine (steam-

turbine) cycle, which is still the main workhorse of power generation industry. The research and development are going mainly towards the use of either supercritical Rankine cycle (with very high pressures and temperatures of live steam) or integrated coal-gasification combined cycle (IGCC). Being the most abundant fossil fuel on the Earth, coal can be used to produce an alternative fuel, synthetic natural gas (SNG or “syngas”) by coal gasification.

State-of-the-art energy conversion systems (one of which is disclosed and described in the prior-art document [4]) claim higher-than-conventional cycle thermal efficiencies and also larger-than-conventional cycle specific outputs. However, the claimed thermal efficiencies are still limited by and lower than the in-theory maximum possible thermal efficiency of a thermodynamic cycle operating between a higher temperature (T_H) and a lower temperature (T_C), that is, the Carnot-cycle efficiency, defined by the following simple expression:

$$\eta_{th} \leq \eta_{th,Carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

In general, thermal efficiency of a thermodynamic cycle is defined as the ratio of the difference between the heat added to the cycle (Q_{in}) and the heat rejected from the cycle (Q_{out}) and the heat added to the cycle (Q_{in}):

$$\eta_{th} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

Obviously, when $Q_{out} = 0$, then the cycle thermal efficiency $\eta_{th} = 1 = 100\%$. This invention shows how this ideal maximum-thermal-efficiency thermodynamic cycle can be practically achieved, thus enabling a much longer use of fossil and nuclear fuels and an efficient reduction of global-warming gases (greenhouse gases) in the Earth’s atmosphere.

II SUMMARY OF THE INVENTION AND PREFERRED CONFIGURATIONS

The disclosed invention (patent applications [1] and [2]) proposes and describes a novel modified and simplified Rankine steam-turbine cycle without rejection of the cycle waste heat, which is driven by a thermocompressor (ejector) operating in the wet-vapor region, to the end of achieving of the maximum possible (~100%) thermal efficiency of the thus modified Rankine cycle. The wet-vapor mixture contained in the modified-Rankine-cycle system and circulating within the thermocompressor is separated in a cylindrical separation tank,

so that the saturated water is pumped to a water heater where it receives the cycle heat input, while the saturated vapor is expanded in a backpressure steam turbine producing useful mechanical work and is then recirculated back to the thermocompressor, where it is being re-pressurized by the primary ejector fluid (pumped and heated saturated water). Since the backpressure-steam-turbine's power output largely exceeds the saturated-water-pump's power input and there is no cycle waste heat rejection, the theoretical maximum thermal efficiency of the thus modified Rankine cycle is close to 100%.

The proposed modified Rankine-cycle power-plant without rejection of the cycle waste heat can be arranged in the 2 (two) following distinctive power-plant configurations:

1. Using a non-superheated (saturated) backpressure steam turbine, with the cycle heat input limited only to the water heater (Fig. 1); and
2. Using a superheated backpressure steam turbine, where the cycle heat input is applied also to the saturated steam separated in the separation tank, in addition to the water heater (Fig. 3).

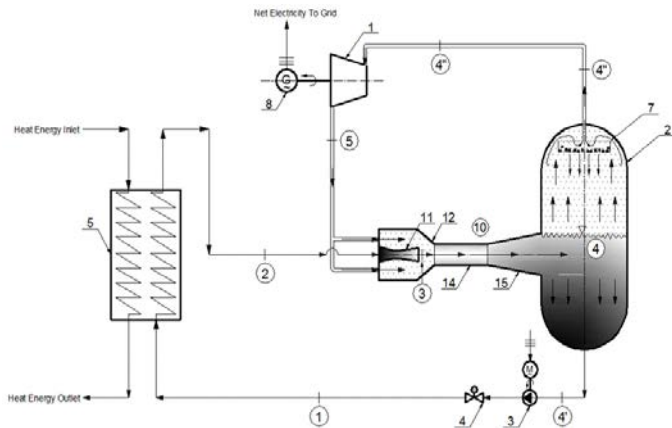


Figure 1. Flow diagram of indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a non-superheated (saturated) backpressure steam turbine

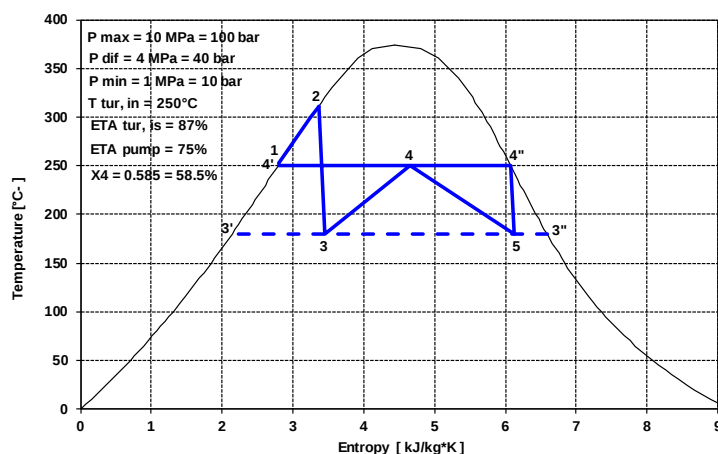


Figure 2. T-s diagram of indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a non-superheated (saturated) backpressure steam turbine

Fig. 2 depicts a temperature/specific-entropy (T-s) diagram corresponding to the modified Rankine-cycle power-plant without rejection of the cycle waste heat, whose flow diagram is depicted in the above Fig. 1, wherein the following symbols are used to designate the involved thermodynamic states and processes:

- State 1 – pumped primary ejector fluid (saturated water) prior to heating in the liquid/water heater (5),
- State 2 – heated primary ejector fluid (saturated water) prior to acceleration in the nozzle (11) of the wet-vapor thermocompressor (10),
- State 3 – heated primary ejector fluid (saturated water) after acceleration in the nozzle (11) of the wet-vapor thermocompressor (10),
- State 4 – wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) of the wet-vapor thermocompressor (10),
- State 4' – saturated liquid (water) at static pressure at the exit of the diffuser (15) of the wet-vapor thermocompressor (10), and at the suction of the condensate pump (3),
- State 4'' – saturated vapor (dry steam) at static pressure at the exit of the diffuser (15) of the wet-vapor thermocompressor (10), and at the inlet of the backpressure steam turbine (1),
- State 5 – secondary ejector fluid (exhausted wet vapor) at the exit of the backpressure steam turbine (1),
- Process 4'-1 – Adiabatic pumping of the primary ejector fluid (saturated water) from the diffuser outlet static pressure to the maximum cycle static pressure,
- Process 1-2 – Isobaric heating of the pumped primary ejector fluid (saturated water) to the maximum cycle temperature in the liquid/water heater (5),
- Process 2-3 – Adiabatic acceleration of the heated primary ejector fluid (saturated water) to the minimum static pressure in the nozzle (11),
- Process 4''-5 – Adiabatic expansion of the secondary ejector fluid (saturated vapor) in the backpressure steam turbine (1) to the minimum static pressure in the nozzle (11),
- Processes 3-4 and 5-4 – Adiabatic compression of the primary ejector fluid (low-quality wet vapor) and the secondary ejector fluid (exhausted high-quality wet vapor), respectively, in the diffuser (15).

Similarly, Fig. 3 depicts a flow diagram of the alternative modified Rankine-cycle power-plant without rejection of the cycle waste heat. The main difference of Fig. 3 relative to Fig. 1 is use of an additional heat exchanger/superheater (6) for isobaric heat addition to the saturated vapor (gas fraction) separated in the cylindrical separation tank (2), to the end superheating of the saturated vapor and thus enabling the backpressure steam turbine (1) to operate with superheated steam at its inlet, resulting in an increased steam-turbine specific work for the same expansion pressure ratio.

Consequently, Fig. 4 depicts a temperature/specific-entropy (T-s) diagram corresponding to the alternative modified Rankine-cycle power-plant depicted in Fig. 3. The following symbols are used

to designate additionally involved/alterd thermodynamic states and processes:

- State 5 – heated primary ejector fluid (superheated vapor/steam) prior to adiabatic expansion in the backpressure steam turbine (1),
- State 6 – secondary ejector fluid (exhausted wet vapor) at the exit of the backpressure steam turbine (1),
- Process 4"-5 – Isobaric heating of the primary ejector fluid (saturated vapor) to a maximum chosen steam temperature in the additional heat exchanger/superheater (6),
- Process 5-6 – Adiabatic expansion of the secondary ejector fluid (superheated vapor/steam) in the backpressure steam turbine (1) to the minimum static pressure in the nozzle (11).

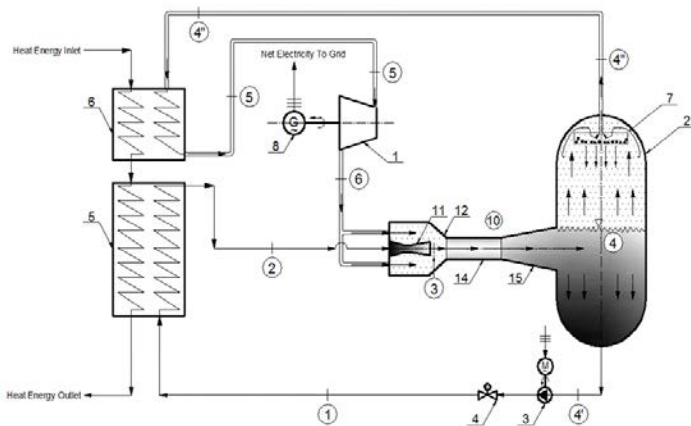


Figure 3. Flow diagram of alternative indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a superheated backpressure steam turbine

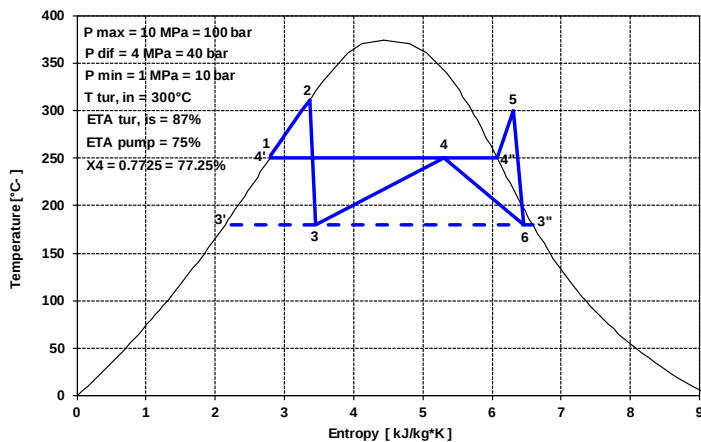


Figure 4. T-s diagram of alternative indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a superheated backpressure steam turbine

It is also important to further emphasize that the expansion pressure ratio (EPR) of the said backpressure steam turbine (1) must be proportional to the pressure recovery ratio of the wet-vapor thermocompressor (10) obtainable at an ejector entrainment ratio (ratio of mass flow rates of suction and driving fluid) that is defined by the vapor quality at the ejector's diffuser

outlet. The EPR of the backpressure steam turbine (1), and thus the ejector entrainment ratio, can be chosen to be a moderate one, say from 2:1 to 4:1, while a lower-than-typical maximum temperature of the cycle heat addition can be used. In relation to this, the invention highlights an option to add a steam compressor (18) to any configuration of the modified Rankine steam-turbine cycle without rejection of the cycle waste heat, which is used for precompression of the secondary ejector fluid (separated saturated steam/vapor) prior to its expansion in the said backpressure steam turbine (1), thus artificially increasing the thermocompressor pressure recovery ratio.

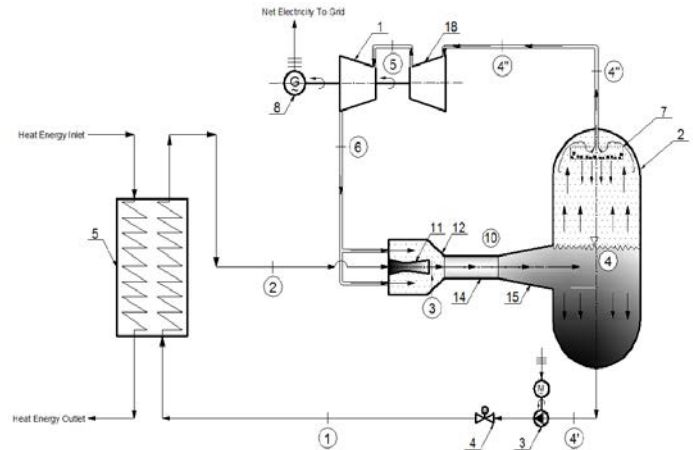


Figure 5. Flow diagram of indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant of Fig. 1 using an additional steam compressor for precompression of the separated steam/vapor prior to its expansion in the backpressure steam turbine

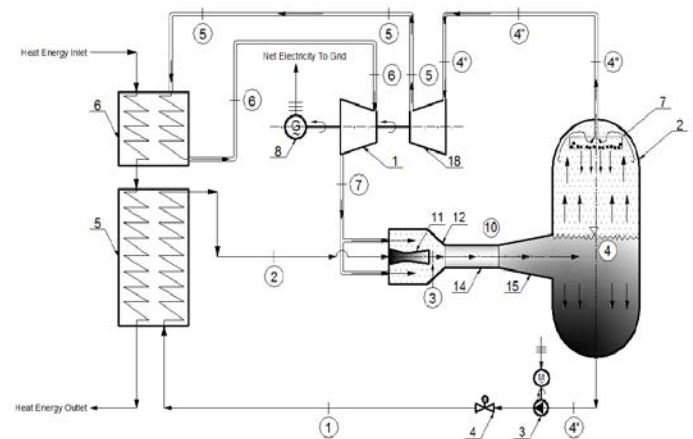


Figure 6. Flow diagram of alternative indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant of Fig. 3 using an additional steam compressor for precompression of the separated steam/vapor prior to its expansion in the backpressure steam turbine

Further, it is possible to perform steam/water separation in the cylindrical separation tank (2) of the proposed modified Rankine-cycle power-plant driven by a wet-vapor-region thermocompressor in several different ways, of which the 3 (three) following ways/means are briefly explained herewith. The first is using a dry-pipe steam separator (located typically within the steam drum of a steam boiler) (Fig. 1 & Fig. 3), having of a

lot of holes at the top and two holes at the bottom half, whereas the turbulently moving steam-water mixture is directed through the top half holes of the dry pipe and forced to separate between water and steam, whereby the separated steam will flow to the steam turbine and the separated water will drop through bottom holes.

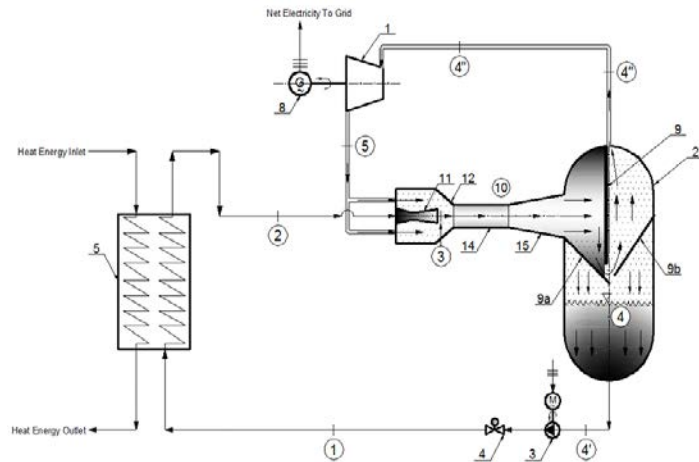


Figure 7. Flow diagram of indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant (Fig. 1) using a baffle-plate steam separator (2)

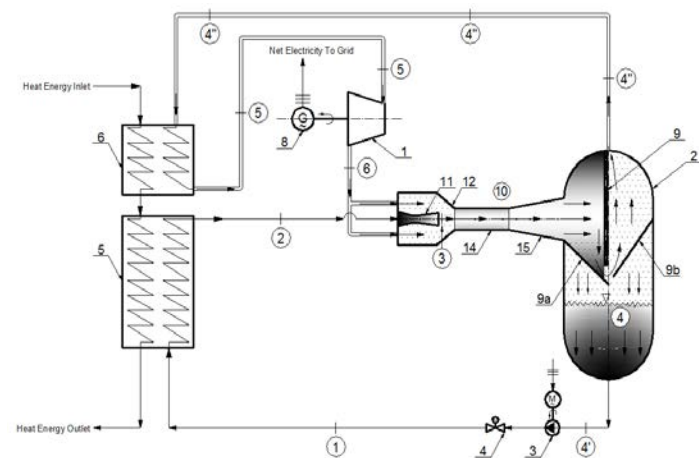


Figure 8. Flow diagram of alternative indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant of Fig. 3 using a baffle-plate steam separator (2)

The second envisages a baffle-plate steam separator (Fig. 7 & Fig. 8), having the cylindrical separation tank fitted with typically two (2) to three (3) baffle plates, which serve to change the direction of the incoming steam flow when the steam strikes the baffle plates, prompting heavier water particles contained in the steam-water mixture to fall down to the bottom of the separation tank, while the separated steam is freed from water particles and passed to the steam turbine.

The third includes a centrifugal/cyclone steam separator typically used in large-scale boilers, having the cylindrical separation tank fitted with at least one cyclone, which utilizes centrifugal force to separate water and steam from the steam-water mixture, whereby the steam-water mixture is forced to move around the cyclone and make the rotation; typically, the more turbulent flow forces

the mixture to separate more easily.

Regulation of the cycle output/load of the proposed modified Rankine-cycle power-plant without rejection of the cycle waste heat in working regimes other than the nominal working regime can be performed using qualitative or quantitative regulation methods.

Qualitative regulation is the regulation of the cycle output/load by alteration of the steam-turbine inlet temperature via the cycle heat input, which, although a quite simple regulation method, can result in a probable existence of a non-stationary normal shock wave (not necessarily a weak one) somewhere in the mixing-chamber throat of a supersonic wet-vapor mixing thermocompressor/ejector for any change of the cycle load and hence change of the ejector working regime, especially in closed-loop configurations of Rankine-cycle power-plants, which could potentially result in a substantial reduction of the recoverable pressure rise in the thermocompressor/ejector.

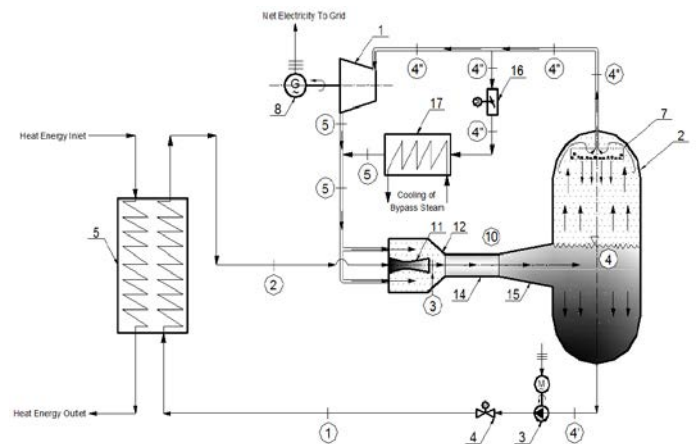


Figure 9. Flow diagram of indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant of Fig. 1 using quantitative regulation of the cycle output via a steam-turbine bypass (16)

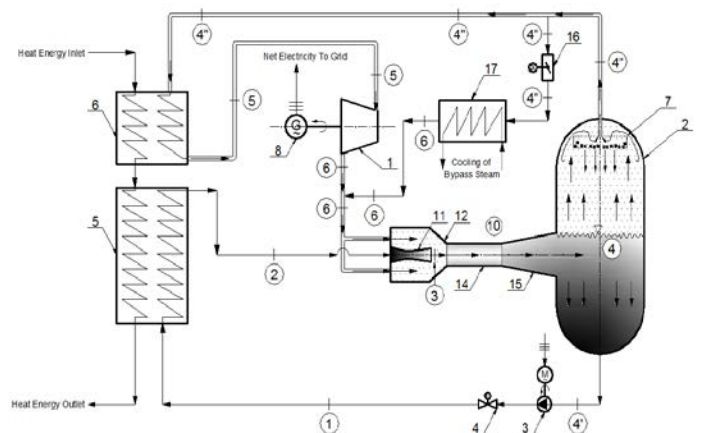


Figure 10. Flow diagram of alternative indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant of Fig. 3 using quantitative regulation of the cycle output via a steam-turbine bypass (16)

Quantitative regulation is the regulation of the cycle output/load by alteration of the steam-turbine mass flow rate using bypassing (16) of the steam turbine and a subsequent external cooling of the

corresponding portion of the steam-turbine bypass mass flow rate regime (using an external water or air cooler, 17) up to the steam-turbine outlet temperature existing in the nominal cycle working (Fig. 9 & Fig. 10), which, coupled with an appropriate thermocompressor design, should ensure that eventually-occurring normal shock wave is preferably located in the mixing-chamber throat of the supersonic wet-vapor mixing ejector and that it is a weak one, occurring in the vicinity of the unity Mach number (1.0), and also a stationary one at a continually maintained steady-state ejector working regime, and hence a potential reduction of the recoverable pressure rise in the thermocompressor/ejector would likely be minor.

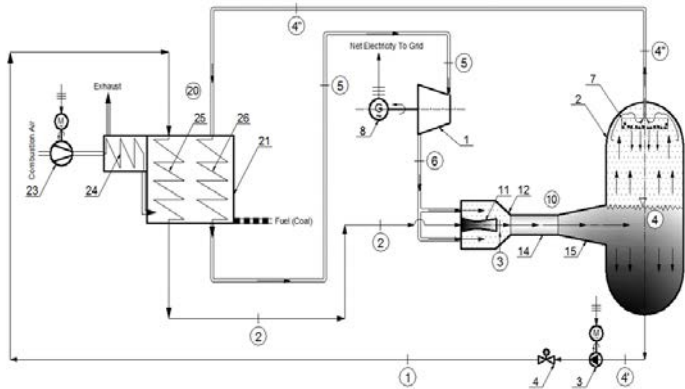


Figure 11. Flow diagram of externally-coal-fired alternative indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a superheated backpressure steam turbine

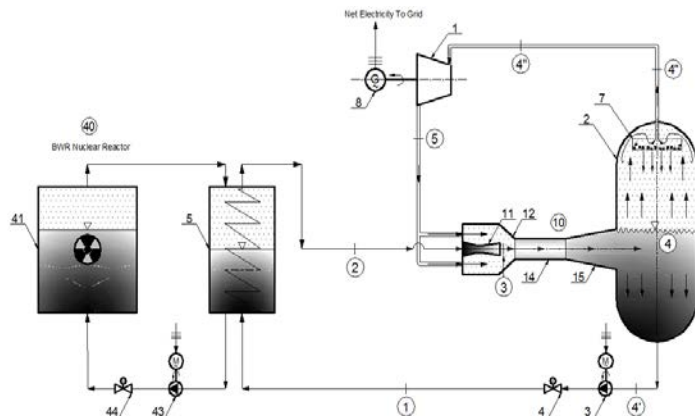


Figure 12. Flow diagram of indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a non-superheated (saturated) backpressure steam turbine powered by a boiling-water nuclear reactor (BWR) (40)

The proposed modified Rankine steam-turbine cycle driven by a wet-vapor-region thermocompressor and without cycle waste heat rejection can ideally be applied in the conventional steam-turbine-cycle thermal power-plants fueled by externally-fired coal (Fig. 11) and/or in indirectly-heated (via a liquid/water heater 5) steam-turbine-cycle power-plant configurations powered by nuclear fuel and using any of the commercially used thermal-neutron nuclear reactors: light-water moderated boiling water reactor (BWR) (Fig. 11 & Fig. 12) and pressurized water reactor (PWR) (Fig. 13 & Fig. 14), heavy-water moderated pressurized heavy-water reactor (PHWR), graphite-moderated

molten salt reactor (MSR) and graphite-moderated gas-cooled reactor (GCR), as well as commercially used fast-neutron nuclear reactors, such as liquid-metal-cooled fast reactor (LMFR).

The proposed modified Rankine steam-turbine cycle driven by wet-vapor-region thermocompressor and without cycle waste heat rejection can also ideally be applied in either directly-heated or indirectly-heated steam-turbine-cycle power-plant configurations fueled/powered by renewable energy sources, such as: Solar energy, biomass and geothermal energy.

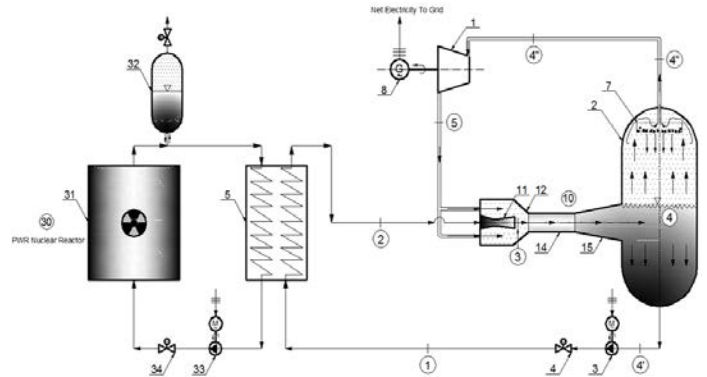


Figure 13. Flow diagram of indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a non-superheated (saturated) backpressure steam turbine powered by a pressurized-water nuclear reactor (PWR) (30)

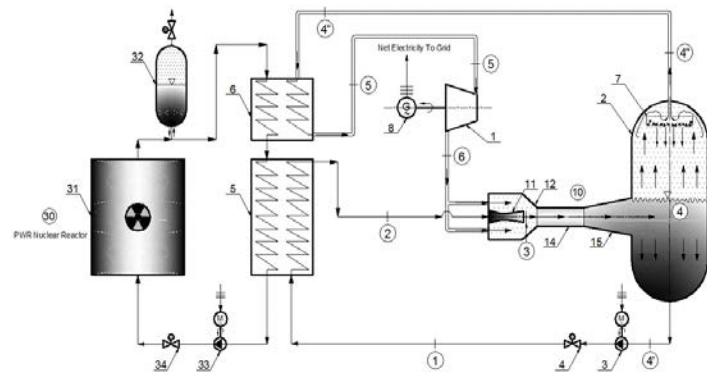


Figure 14. Flow diagram of alternative indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a superheated backpressure steam turbine powered by a pressurized-water nuclear reactor (PWR) (30)

Alternatively, PWR-based (and even PHWR-based) nuclear power plants may opt and attempt to use the directly-heated liquid reactor coolant as a primary fluid of the ejector/thermocompressor, thus omitting use of the intermediary liquid/water heater 5.

In addition, the proposed modified Rankine steam-turbine cycle driven by a wet-vapor-region thermocompressor and without cycle waste heat rejection can also be very suitably applied as an indirectly-heated bottoming steam-turbine-cycle power-plant of a natural-gas-fired combined gas-turbine/steam-turbine cycle (NGCC).

In addition, the boiler or the integral water/steam heater (20) in

the externally-fired (by coal, solid/liquid waste fuel or biomass) configuration of the proposed modified Rankine steam-turbine cycle power-plant (depicted in Fig. 15) is simpler (and therefore likely less expensive) than the boiler of a conventional steam-turbine power-plant, since it does not include either an evaporator nor a steam reheater. It incorporates the liquid/water heater 5 and the superheater 6 in the form of multi-tube bundles 25 and 26, respectively, and in addition also contains a furnace refractory 21, a forced-draft fan 23 for combustion-air circulation, and a regenerative combustion-air preheater 24.

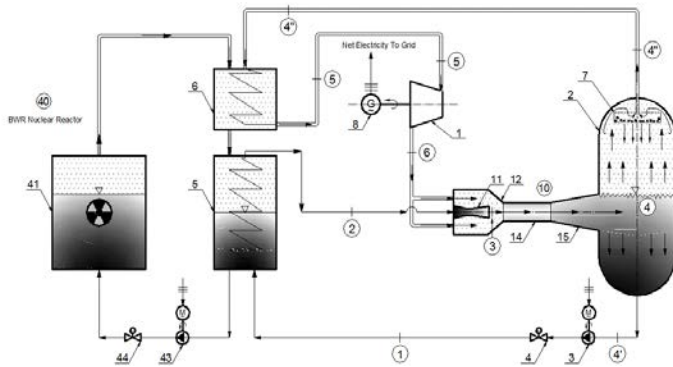


Figure 15. Flow diagram of alternative indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a superheated backpressure steam turbine powered by a boiling-water nuclear reactor (BWR) (40)

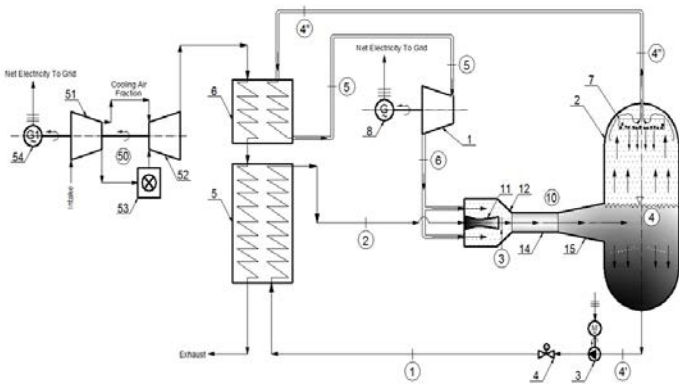


Figure 16. Flow diagram of alternative indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a superheated backpressure steam turbine powered by waste heat of a natural-gas-fired combined gas-turbine/steam-turbine cycle (NGCC) (50)

Finally, the fact that the proposed modified Rankine steam-turbine cycle driven by a wet-vapor-region thermocompressor is without cycle waste heat rejection should be emphasized, because it also means that it either does not include the condensation process. Consequently, the proposed modified Rankine steam-turbine cycle configurations contain neither the condenser system nor the feedwater regenerative heater system, which considerably reduces the capital cost of the proposed modified Rankine-cycle power-plant.

The proposed energy-conversion concept was derived based on the Serbian patent [3]. It bears some configurational similarity

with the advanced vapor-ejector-based refrigeration system disclosed in the US patent publication [4], however, not the functional similarity, because the herewith proposed concept is from the power-generation/energy-conversion field. Besides, the prior-art source [4] uses vapor/steam as the primary ejector fluid, while the herewith proposed energy concept uses heated water as the primary ejector fluid, while the vapor/steam is the secondary ejector/thermoccompressor fluid.

III APPLIED MATHEMATICAL MODEL

Applied mathematical model uses the following simple system of basic fluid-mechanic & thermodynamic equations: conservation of energy equation, expressions for saturated water and saturated vapor (quality) mass fractions in an equilibrium wet-vapor mixture, wet-vapor enthalpy expression, and expression for primary ejector fluid velocity at nozzle outlet, as follows:

$$\dot{m}_{prim} \cdot \left(h_3 + \frac{v_3^2}{2} \right) + \dot{m}_{sec} \cdot \left(h_5 + \frac{v_5^2}{2} \right) = (\dot{m}_{prim} + \dot{m}_{sec}) \cdot \left(h_4 + \frac{v_4^2}{2} \right)$$

$$\dot{m}_{prim} = \dot{m}_{H2O} \cdot (1 - x_4) \quad \& \quad \dot{m}_{sec} = \dot{m}_{H2O} \cdot x_4 \rightarrow (\dot{m}_{prim} + \dot{m}_{sec}) = \dot{m}_{H2O}$$

$$h_4 = h'_4 + x_4 \cdot (h''_4 - h'_4) \quad \& \quad v_3 = \sqrt{2 \cdot (h_2 - h_3)}$$

where: $\dot{m}_{prim}$ and $\dot{m}_{sec}$ [kg/s] are mass flow rates of the primary ejector fluid, or jet/motion fluid (pumped and heated saturated liquid/water in this case) and the secondary ejector fluid, or suction (injected) fluid (exhausted wet vapor in this case), $\dot{m}_{H2O}$ [kg/s] is total mass flow rate of the wet-vapor mixture, that is, the sum of mass flow rates of the primary and the secondary ejector fluid, h_2 [kJ/kg] and h_3 [kJ/kg] are enthalpies of the jet/motion fluid prior to and after acceleration in the nozzle (11) of the wet-vapor thermocompressor (10), respectively, h_4 [kJ/kg] is enthalpy of the wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) of the wet-vapor thermocompressor (10), h'_4 [kJ/kg] and h''_4 [kJ/kg] are saturated liquid (water) and saturated vapor (dry steam) enthalpies, respectively, at static pressure at the exit of the diffuser (15) of the wet-vapor thermocompressor (10), x_4 [-] is quality of the wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) of the wet-vapor thermocompressor (10), v_3 [m/s] is velocity of the jet/motion fluid after acceleration in the nozzle (11) of the wet-vapor thermocompressor (10), v_4 [m/s] is velocity of the wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) of the wet-vapor thermocompressor (10), and v_5 [m/s] is velocity of the suction (injected) fluid (exhausted wet vapor) at the exit of the backpressure steam turbine (1).

Combining and rearranging the above equations, the vapor quality at the exit of the wet-vapor-region thermocompressor diffuser, x_4 , can be expressed as follows:

$$\rightarrow (1 - x_4) \cdot h_2 + x_4 \cdot \left(h_5 + \frac{v_5^2}{2} \right) = \left[h'_4 + x_4 \cdot (h''_4 - h'_4) + \frac{v_4^2}{2} \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow h_2 - h'_4 - \frac{v_4^2}{2} = x_4 \cdot \left(h''_4 - h'_4 + h_2 - h_5 - \frac{v_5^2}{2} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow x_4 = \frac{\left(h_2 - h'_4 - \frac{v_4^2}{2} \right)}{\left(h''_4 - h'_4 + h_2 - h_5 - \frac{v_5^2}{2} \right)}$$

Thermal efficiency of the modified Rankine cycle without cycle-heat rejection and driven by a wet-vapor-region thermocompressor is then defined according to the following expression:

$$\eta_{cycle} = \frac{x_4 \cdot (h''_4 - h_5) - (1 - x_4) \cdot (h_1 - h'_4)}{(1 - x_4) \cdot (h_2 - h_1)}$$

where: h_1 [kJ/kg] is enthalpy of the pumped primary ejector fluid (saturated water) prior to heating in the liquid/water heater (5).

The above explained mathematical model has been based on the general assumption of uniformity of static pressure across the mixing-tube/chamber inlet: ($p_3/p_5 = 1.0$), where p_5 [kPa] is static pressure of the secondary ejector fluid (exhausted wet vapor) after adiabatic expansion in the backpressure steam turbine (1), while p_3 [kPa] is static pressure of the primary ejector fluid (saturated water) after adiabatic acceleration in the nozzle (11).

An exemplary case #1 has been chosen, which applies to the configuration of indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a non-superheated (saturated) backpressure steam turbine (depicted in Fig. 1). The following general assumptions have been adopted: the backpressure-steam-turbine isentropic efficiency of $\eta_{i,turb} = 87\%$, overall efficiency of the condensate pump of $\eta_{pump} = 75\%$, the maximum cycle static pressure of $p_1 = p_2 = 10$ MPa (100 bar or 1,450 psi), the minimum static pressure at the outlet of the nozzle (11) of $p_3 = p_5 = 1$ MPa (10 bar or 145 psi), the designed static pressure at the outlet of the diffuser (15) of $p_4 = 4$ MPa (40 bar or 580 psi), the velocity of the wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) of $v_4 = 200$ m/s, and the velocity of the secondary ejector fluid (exhausted wet vapor) at the exit of the backpressure steam turbine (1) of $v_5 = 100$ m/s. Neglecting pressure drop in the liquid/water heater (5), the calculation shows that the cycle thermal efficiency of $\eta_{cycle,1a} \sim 87.47\%$ of the proposed modified Rankine-cycle power-plant configuration depicted at Fig. 1 is achievable, at the vapor quality at the exit of the wet-vapor-region thermocompressor diffuser of $x_{4,1a} = 0.557$. However, the cycle thermal efficiency of the proposed modified Rankine-cycle power-plant configuration depicted at Fig. 1 can be even higher, almost close to 100%, when the velocity of the wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) becomes equal to the velocity of the secondary ejector fluid (exhausted wet vapor) at the exit of the backpressure steam turbine (1), that is, when $v_4 = v_5 = 100$ m/s: $\eta_{cycle,1b} \sim 98.39\%$ is achievable, at the vapor quality at the exit of the wet-vapor-region thermocompressor diffuser of $x_{4,1b} \sim 0.5848$.

Similarly, an exemplary case #2 has been chosen, which applies to the configuration of indirectly-heated modified Rankine-cycle power-plant using a superheated backpressure steam turbine (depicted in Fig. 3). The following additional/alterd general assumptions have been adopted: the maximum chosen steam temperature in the additional heat exchanger/superheater (6) of

$T_5 = 300^\circ\text{C}$ (573 K or 572°F) at the designed static pressure at the outlet of the diffuser (15) of $p_4 = 4$ MPa (40 bar or 580 psi), velocity of the wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) of $v_4 = 200$ m/s, and velocity of the secondary ejector fluid (exhausted wet vapor) at the exit of the backpressure steam turbine (1) of $v_6 = 100$ m/s. Neglecting pressure drops in both the liquid/water heater (5) and the additional heat exchanger /superheater (6), the calculation shows that the cycle thermal efficiency of $\eta_{cycle,IIa} = 91.64\%$ of the proposed modified Rankine-cycle power-plant configuration depicted at Fig. 3 is achievable, at the vapor quality at the exit of the wet-vapor-region thermocompressor diffuser of $x_{4,IIa} \sim 0.736$. However, the cycle thermal efficiency of the proposed modified Rankine-cycle power-plant configuration depicted at Fig. 3 can be even higher, ideally close to 100%, when the velocity of the wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) becomes equal to the velocity of the secondary ejector fluid (exhausted wet vapor) at the exit of the backpressure steam turbine (1), that is, when $v_4 = v_6 = 100$ m/s: $\eta_{cycle,IIb} = 99.4\%$ is achievable, at the vapor quality at the exit of the wet-vapor-region thermocompressor diffuser of $x_{4,IIb} \sim 0.773$.

In the above calculations of exemplary cases #1 and #2 it has been assumed that the pressure recovery ratio of the said thermocompressor (10) is 4:1, which may seem an overestimation. However, similar calculation results and cycle efficiencies would have been obtained even for a much lower assumed thermocompressor pressure recovery ratio of 2:1. For such or even lower thermocompressor pressure recovery ratios, it is recommendable and feasible to use the said optional steam compressor (18), which artificially increases the pressure recovery ratio of the said thermocompressor (10), thus allowing the said backpressure steam turbine (1) driving the said steam compressor (18) to still achieve a positive net surplus work.

IV CONCLUSION

A novel modified and simplified Rankine steam-turbine cycle without rejection of the cycle waste heat has been proposed, which is driven by a thermocompressor (ejector) operating in the wet-vapor region, to the end of achieving of the maximum possible ($\sim 100\%$) thermal efficiency of the thus modified Rankine cycle. The wet-vapor mixture contained in the modified-Rankine-cycle system and circulating within the thermocompressor is separated in a cylindrical separation tank, so that the saturated water is pumped to a water heater where it receives the cycle heat input, while the saturated vapor is expanded in a backpressure steam turbine producing useful mechanical work and is then recirculated back to the thermocompressor, where it is being re-pressurized by the primary ejector fluid (pumped and heated saturated water). Since the backpressure-steam-turbine's power output largely exceeds the saturated-water-pump's power input and there is no cycle heat rejection, the theoretical maximum thermal efficiency of the thus modified Rankine cycle is close to 100%.

The result of the above calculation for exemplary case #1 shows that nearly 100%-cycle-thermal-efficiency can be obtained using the basic configuration (Fig. 1) of the proposed modified Rankine cycle without rejection of the cycle waste heat & driven

by the wet-vapor-region thermocompressor, provided the velocity of the wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) is equal to the velocity of the secondary ejector fluid (exhausted wet vapor) at the exit of the backpressure steam turbine (1), that is, when $v_4 = v_5$.

Similarly to conclusion for exemplary case #1, the above calculation result for the exemplary case #2 shows that almost exactly 100%-cycle-thermal-efficiency can be obtained even more easily using the altered configuration (Fig. 3) of the proposed modified Rankine cycle cycle without rejection of the cycle waste heat & driven by the wet-vapor-region thermocompressor, provided the velocity of the wet-vapor mixture at the exit of the diffuser (15) is equal to the velocity of the secondary ejector fluid (exhausted wet vapor) at the exit of the backpressure steam turbine (1), that is, when $v_4 = v_6$.

The proposed concept of the modified Rankine steam-turbine cycle can ideally be applied in steam-turbine-cycle power-plant configurations externally-fired by any kind of fuel (fossil or nuclear), any type of waste heat or a suitable type of renewable energy sources (geothermal, Solar or biomass), using either direct heating or indirect heating of the working gas. Finally, the proposed modified-Rankine steam-turbine cycle is without cycle waste heat rejection, which also means that it does not include the condensation process, and, consequently the proposed power-plant contains neither the condenser system nor the regenerative feedwater heater system, which considerably reduces capital cost of the proposed modified Rankine-cycle power-plant.

ZAHVALNICA / ACKNOWLEDGEMENT

I use this occasion to express eternal memory to our dear colleague and a frequent participant and admin of similar international energy conferences held in Serbia, too early late *Dr. Aleksandar Nikolić* of the Institute of Electrical Engineering "Nikola Tesla" in Belgrade, Serbia. Rest in peace, my and our dear friend.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Stanković, B. Modified rankine cycle without heat rejection; driven by a wet-vapor-region thermocompressor, registered/filed as Canadian Patent Application No. 3,171,469 with the CIPO (August 22nd, 2022). <https://patents.google.com/patent/CA3171469A1/en> [preuzeto 03.03.2024]
- [2] Stanković, B. Modified rankine cycle without heat rejection; driven by a wet-vapor-region thermocompressor, registered/filed as us utility patent application #18/364,739 with the USPTO (August 3rd, 2023). <https://patents.google.com/patent/US20240191640A1/en> [preuzeto 03.03.2024]
- [3] Stanković, B. Recuperated gas-turbine cycle power-plant with mixing ejector powered by pressurized water, registered as patent No. 57127 B1 with the Serbian Intellectual Property Office, Belgrade, Serbia, granted on June 19th, 2018. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/058185207/publication/RS20161092A1?q=branko%20stankovic> [preuzeto 03.03.2024]
- [4] Wang, J., Verma, P. High Efficiency Ejector Cycle, a US utility patent application publication US 2013/0111944 A1 with the USPTO (May 9th, 2013). <https://patents.google.com/patent/US20130111935A1/en> [preuzeto 03.03.2024]

AUTOR/AUTHOR

Branko Stankovic – Master of Science in Mechanical Engineering, Professional Engineers of Ontario, stankovb@yahoo.com, ORCID [0009-0000-8393-7699](https://orcid.org/0009-0000-8393-7699)

Modifikovani Rankinov ciklus parne turbine bez odbacivanja toplote kondenzacije ciklusa, pokretan termokompresorom koji radi u oblasti vlažne pare

Rezime - Prikazani koncept se odnosi na novi modifikovani i pojednostavljeni Rankinov ciklus parne turbine bez odbacivanja otpadne toplote kondenzacije ciklusa, koji pokreće termokompresor (ejektor) koji radi u oblasti vlažne pare. Ovako modifikovani Rankinov ciklus parne turbine teoretski može postići maksimalnu moguću toplotnu efikasnost (~100%). Smeša vlažne pare koja cirkuliše unutar termokompresora se odvaja u namenskom cilindričnom rezervoaru za separaciju (faza), tako da se zasićena voda pumpa do zagrejača vode/bojlara gde prima ulaznu toplotu ciklusa, dok zasićena para ekspandira u jednoj protiv-pritisnoj parnoj turbini, proizvodeći koristan mehanički rad, a zatim se vraća nazad u termokompresor, gde joj se pritisak ponovo podiže posredstvom primarnog fluida (pumpane i zagrejane zasićene vode). Ovaj koncept se može primeniti na elektrane sa ciklusom parne turbine koje koriste: ugalj ili čvrsto/tečno/gasovito gorivo, otpadnu toplotu, nuklearno gorivo (koje koriste reaktori sa ključalom vodom, reaktori sa vodom pod pritiskom, reaktori sa teškom vodom pod pritiskom, reaktori hlađeni gasom, reaktori hlađeni rastopljenim solima ili brzi reaktori hlađeni tečnim metalima) ili obnovljive izvore energije (Sunčeva energija, biomasa, geotermalna energija). Ovaj koncept se takođe može primeniti kao "donji" deo ciklusa parne turbine u nekoj elektrani kombinovanog ciklusa gasne turbine i parne turbine.

Ključne reči - modifikovani Rankinov ciklus bez odbacivanja otpadne toplote kondenzacije ciklusa, termokompresor koji radi u oblasti vlažne pare, maksimalno moguća toplotna efikasnost ciklusa

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