

OPTIMIZACIJA INTEGRACIJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE U SAVREMENE ELEKTROENERGETSKE MREŽE

Stručni rad

DOI: 10.5937/GU_KORET26087P

Gradimirka PopovićAkademija strukovnih studija kosovsko metohijska, Leposavić,
gradimirka.popovic@akademijakm.edu.rs, ORCID: 0009-0007-9045-6739

APSTRAKT: *Savremeni elektroenergetski sistemi suočavaju se sa sve većim zahtevima za održivošću i smanjenjem emisije štetnih gasova, što dovodi do povećanja učešća obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije. Međutim, integracija ovih izvora, pre svega solarnih i vetroelektrana, donosi izazove u vidu intermitentnosti proizvodnje, nestabilnosti mreže i potrebe za fleksibilnim upravljanjem energijom. U ovom radu analiziraju se ključni tehnički i sistemski aspekti integracije obnovljivih izvora energije, uključujući sisteme za skladištenje energije, pametne mreže i metode prognoziranja proizvodnje. Poseban fokus stavljen je na stabilnost elektroenergetskog sistema, balansiranje opterećenja i optimizaciju rada mreže. Rezultati pokazuju da uspešna integracija zahteva kombinaciju naprednih tehnologija, digitalizacije i odgovarajućih regulatornih okvira. Zaključuje se da su fleksibilnost i otpornost sistema ključni faktori za održivu energetska tranziciju.*

Ključne reči: *obnovljivi izvori energije, elektroenergetski sistem, pametne mreže, skladištenje energije, stabilnost sistema*

OPTIMIZATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTEGRATION INTO MODERN ELECTRIC POWER GRIDS

ABSTRACT: *Modern power systems are facing increasing demands for sustainability and reduction of harmful gas emissions, leading to a higher share of renewable energy sources in electricity generation. However, the integration of these sources, primarily solar and wind power plants, brings challenges in terms of intermittent generation, grid instability, and the need for flexible energy management. This paper analyzes the key technical and systemic aspects of renewable energy integration, including energy storage systems, smart grids, and production forecasting methods. Special focus is placed on the stability of the power system, load balancing, and network operation optimization. The results show that successful integration requires a combination of advanced technologies, digitalization, and appropriate regulatory frameworks. It is concluded that system flexibility and resilience are key factors for a sustainable energy transition.*

Keywords: *renewable energy sources, electric power system, smart grids, energy storage, system stability*

Gradanska uprava

1. UVOD

Savremeni elektroenergetski sistemi suočavaju se sa intenzivnim promenama usled globalnih zahteva za dekarbonizacijom i održivim razvojem. U tom kontekstu, integracija obnovljivih izvora energije postaje ključni pravac razvoja energetike. Za razliku od konvencionalnih izvora, obnovljivi izvori energije karakterišu se promenljivom i teško predvidivom proizvodnjom. Ova varijabilnost značajno utiče na stabilnost elektroenergetskog sistema i zahteva primenu novih metoda upravljanja i optimizacije [1].

Obnovljivi izvori energije (OIE) su prirodni, neiscrpn i obnovljivi izvori koji se obnavljaju u relativno kratkom vremenskom periodu i imaju ključnu ulogu u smanjenju emisije CO₂ i očuvanju životne sredine. Njihova glavna karakteristika je održivost i mogućnost korišćenja bez iscrpljivanja resursa.

Osnovne karakteristike obnovljivih izvora energije su:

- Neiscrpnost i obnavljanje
 - Sunčeva energija, vetar, voda, biomasa i geotermalna energija stalno se obnavljaju u prirodi. Za razliku od fosilnih goriva, njihova eksploatacija ne dovodi do iscrpljivanja resursa.
- Ekološka održivost
 - Minimalna emisija CO₂ i drugih štetnih gasova tokom proizvodnje energije.
 - Značajno doprinose borbi protiv klimatskih promena i smanjenju zagađenja vazduha.
- Raznovrsnost izvora
 - Sunčeva energija – fotonaponske ćelije i solarni kolektori.
 - Energija vetra – vetroturbine za proizvodnju električne energije.
 - Hidroenergija – velike hidroelektrane, mikro hidro sistemi, energija plime i oseke.
 - Biomasa i biogas – korišćenje organskog otpada i poljoprivrednih ostataka.
 - Geotermalna energija – toplota iz unutrašnjosti Zemlje.
- Regionalni potencijal
 - Srbija raspolaže značajnim potencijalom u biomasi (oko 60% ukupnog potencijala OIE) i hidroenergiji (oko 25.000 GWh godišnje).

Prednosti korišćenja su:

- Održivost: dugoročno dostupni izvori energije.
- Energetska sigurnost: smanjuju zavisnost od uvoza fosilnih goriva.
- Razvoj lokalne ekonomije: otvaranje novih radnih mesta u sektoru OIE.
- Decentralizacija proizvodnje: mogućnost lokalne proizvodnje energije (mikromreže).

Nedostaci i izazovi su:

- Varijabilnost proizvodnje (posebno kod sunca i vetra).
- Visoki početni troškovi instalacije tehnologija.
- Potreba za skladištenjem energije radi stabilnosti mreže.
- Zavisnost od geografskih uslova (npr. vetar nije ravnomerno raspoređen).

Tabela 1: Poređenje obnovljivih izvora

Izvor energije	Prednosti	Nedostaci
Sunčeva energija	Neiscrpnna, dostupna svuda	Varijabilna, zavisi od vremena
Vetar	Čista, brza instalacija	Potrebna vetrovita područja
Hidroenergija	Stabilna proizvodnja, skladištenje	Ekološki uticaj na ekosisteme
Biomasa	Iskoristivost otpada, lokalna	Emisije pri sagorevanju
Geotermalna	Konstantna energija	Ograničena na određene regione

Obnovljivi izvori energije predstavljaju ključnu komponentu energetske tranzicije ka održivom sistemu. Njihove karakteristike – neiscrpnost, ekološka prihvatljivost i raznovrsnost – čine ih osnovom za budući razvoj elektroenergetskih mreža. Međutim, za njihovu punu integraciju potrebno je rešiti izazove varijabilnosti i skladištenja energije [2].

Obnovljivi izvori energije imaju sledeće karakteristike:

- zavisnost od vremenskih uslova
- decentralizovana proizvodnja
- niska marginalna cena proizvodnje
- ekološka prihvatljivost

Najznačajniji izvori uključuju solarne elektrane, vetroelektrane, hidroelektrane i biomasu. Njihova integracija utiče na stabilnost frekvencije, napona i ukupnu pouzdanost sistema.

2. IZAZOVI INTEGRACIJE U ELEKTROENERGETSKE MREŽE

Integracija obnovljivih izvora energije u elektroenergetske mreže donosi značajne tehničke i organizacione izazove, posebno u pogledu balansiranja sistema, skladištenja energije i pouzdanosti mreže. Ključni problemi su varijabilnost proizvodnje, ograničeni kapaciteti za skladištenje i potreba za modernizacijom infrastrukture [3].

2.1 Glavni izazovi integracije

2.1.1 Tehnički izazovi

- Balansiranje i bilansiranje sistema: Varijabilna proizvodnja iz vetra i sunca zahteva brze rezerve i fleksibilne kapacitete.
- Stabilnost mreže: Fluktuacije u proizvodnji mogu izazvati ispade i poremećaje u prenosnoj i distributivnoj mreži.
- Kapacitet skladištenja: Nedostatak baterijskih sistema i drugih tehnologija za skladištenje otežava integraciju velikih kapaciteta OIE.
- Priključenje na mrežu: Ograničeni kapaciteti prenosne i distributivne mreže otežavaju povezivanje novih elektrana.

2.1.2 Organizacioni i tržišni izazovi

- Energetska politika: Potrebna je jasna strategija za dekarbonizaciju i podsticaje za investitore.
- Tržišni mehanizmi: Fleksibilna cena električne energije i tržišta balansne energije su ključna za održivost.
- Komercijalni faktori: Investitori se suočavaju sa rizicima vezanim za priključenje i stabilnost sistema.

Tehnološka rešenja

- Pametne mreže (Smart Grids): Digitalizacija i automatizacija omogućavaju bolju kontrolu i balansiranje.
- Mikromreže: Lokalne mreže sa sopstvenim skladištenjem i kontrolom smanjuju opterećenje glavnog sistema.
- Napredni sistemi skladištenja: Litijum-jonske baterije, vodonik i pumpne hidroelektrane.
- Prediktivni algoritmi: Bolje prognoze proizvodnje iz OIE smanjuju rizik od neravnoteže.
- Integracija OIE donosi niz tehničkih izazova:
 - Varijabilnost proizvodnje – fluktuacije snage usled vremenskih uslova
 - Nestabilnost sistema – problemi sa održavanjem frekvencije i napona
 - Balansiranje sistema – potreba za kontinuiranim usklađivanjem proizvodnje i potrošnje
 - Kvalitet električne energije – pojava harmonika i padova napona

Tradicionalne mreže nisu projektovane za rad sa velikim brojem distribuiranih izvora, što dodatno komplikuje njihovu integraciju.

Tabela 2: Poređenje izazova i rešenja

Izazov	Posledica	Potencijalno rešenje
Varijabilna proizvodnja	Nestabilnost mreže	Pametne mreže, balansne rezerve
Nedostatak skladištenja	Višak ili manjak energije	Baterije, vodonik, pumpne HE
Ograničeni kapaciteti mreže	Otežano priključenje novih OIE	Modernizacija prenosne/distributivne
Tržišna nefleksibilnost	Neefikasna raspodela resursa	Dinamičko tržište balansne energije

Integracija obnovljivih izvora energije u elektroenergetske mreže je nužan korak ka dekarbonizaciji i održivoj energetici, ali zahteva kombinaciju tehničkih inovacija, regulatornih reformi i tržišnih prilagođavanja. Poseban fokus treba staviti na razvoj skladišta energije i pametnih mreža, jer oni omogućavaju stabilnost i sigurnost sistema u uslovima rastuće penetracije OIE [4].

3. METODE OPTIMIZACIJE INTEGRACIJE OIE

Pametne mreže omogućavaju dvosmernu komunikaciju između proizvođača i potrošača, automatizaciju upravljanja i efikasnu integraciju distribuiranih izvora. Skladištenje energije ima ključnu ulogu u stabilizaciji sistema: baterijski sistemi, pumpne hidroelektrane, superkondenzatori

Ove tehnologije omogućavaju akumulaciju viška energije i njeno korišćenje u periodima povećane potrošnje [5].

3.1 Optimizacioni algoritmi

Savremeni elektroenergetski sistemi koriste napredne metode optimizacije:

- linearno programiranje
- genetske algoritme
- metode mašinskog učenja

Ovi algoritmi omogućavaju optimalno upravljanje proizvodnjom, potrošnjom i skladištenjem energije.

4. MATEMATIČKI MODEL OPTIMIZACIJE

Optimizacija rada elektroenergetskog sistema se najčešće modeluje kao problem minimizacije ukupnih troškova proizvodnje i prenosa električne energije, uz poštovanje tehničkih i operativnih ograničenja.

Cilj je minimizacija funkcije troškova

$$\min C = \sum_{i=1}^N C_i(P_i)$$

$C_i(P_i)$ – trošak proizvodnje u elektrani i kao funkcija proizvedene snage P_i

N – broj elektrana u sistemu

Balans snage određujemo na sledeći način:

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_{gubici}$$

P_D – ukupna potrošnja

P_{gubici} – gubici u mreži

Granice proizvodnje se prikazuju kao:

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax}, i = 1, \dots, N$$

Primer ciljne funkcije, ako je trošak svake elektrane kvadratna funkcija:

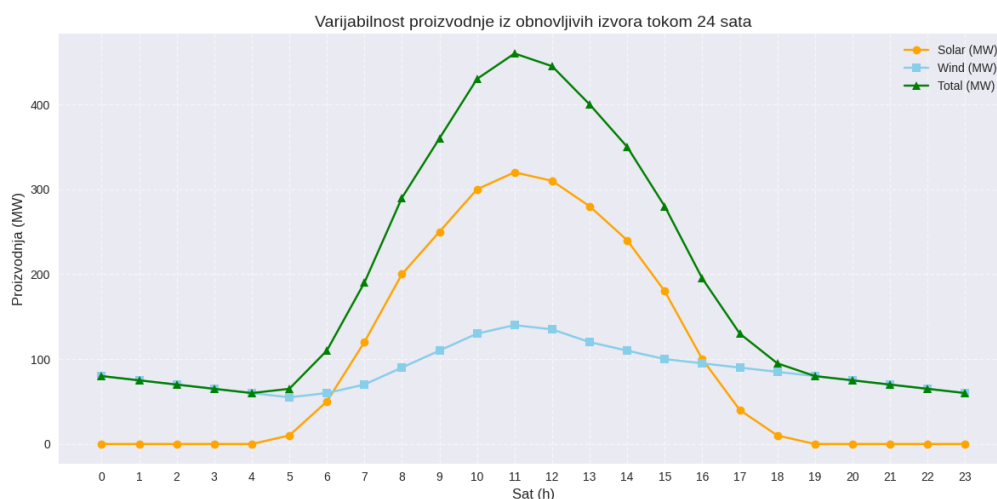
$$C_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$$

Onda ukupan trošak sistema postaje

$$C = \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)$$

Analiza pokazuje da kombinacija pametnih mreža, skladištenja energije i optimizacionih algoritama značajno doprinosi stabilnosti sistema. Digitalizacija omogućava preciznije upravljanje tokovima energije, dok uključivanje potrošača kroz upravljanje potrošnjom dodatno povećava fleksibilnost sistema.

Posebno značajnu ulogu imaju sistemi za skladištenje energije, koji omogućavaju smanjenje varijabilnosti i poboljšanje pouzdanosti elektroenergetskog sistema [6].



Slika 1: Varijabilnost proizvodnje iz obnovljivih izvora (linijski grafikon)

Linijski grafikon prikazuje kako se proizvodnja iz solarnih i vetroelektrana menja tokom 24 sata – solarna energija ima snažan dnevni pik oko podneva, dok vetar pokazuje stabilniju, ali varijabilnu proizvodnju. Ukupna snaga je zbir oba izvora.

5. ZAKLJUČAK

Integracija obnovljivih izvora energije predstavlja ključni korak ka održivom razvoju elektroenergetskih sistema. Međutim, ona zahteva primenu naprednih tehnologija i optimizacionih metoda kako bi se obezbedila stabilnost i efikasnost sistema.

Budući razvoj energetske sistema biće zasnovan na digitalizaciji, automatizaciji i povećanoj fleksibilnosti, uz sve veće učešće obnovljivih izvora energije.

LITERATURA

- [1] Vladimir Bečejac, Aleksandar Georgiev, Milan Trifunović, Damjan Ilić, (2025) Implementation and Benefits of Imbalance Netting Optimization Module in the Power System of Serbia, *Energija, ekonomija, ekologija*, 2, XXVII (34-40)
- [2] H. Lund, *Renewable Energy Systems*, 2014.
- [3] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, 2005.
- [4] IEA, *World Energy Outlook*, 2023.
- [5] IEEE, *Transactions on Power Systems*, 2022.
- [6] European Commission, *Clean Energy Package*, 2019.