

**UTICAJ PRIKLJUČENJA FOTONAPONSKE ELEKTRANE NA DISTRIBUTIVNU MREŽU****THE IMPACT OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANT CONNECTION ON DISTRIBUTED NETWORK**Igor Bjelica, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu se razmatraju dva osnovna problema koja nastaju priključenjem fotonaponske elektrane na distributivnu mrežu (DM): problem varijabilnosti snage i problem "Duck curve". Prvo je prikazan teorijski uvod o oba problema, a kasnije se predlažu strategije za njihovo suzbijanje. Uticaj priključenja fotonaponske elektrane na DM razmatra se na primeru jednostavne test mreže. U tu svrhu, razvijen je matematički model u programskom jeziku C#. Dobijeni rezultati predstavljani su kroz dijagrame na osnovu kojih se vrši analiza.

**Ključne reči:** Distributivna mreža, Fotonaponska elektrana

**Abstract** – In this paper are considered two fundamental problems which occur in connection of photovoltaic power plant on distributed network. It is analyzed the problem of power variability and the problem of "Duck curve". First, it is shown the theoretical introduction about both problems and then proposes strategies for their suppression. In the second part of the work it was analyzed the impact of power plant connection on distributed network. This research is being conducted on test network. The mathematical model for analyzing was developed in the C # programming language. The obtained results are presented through diagrams on the basis of which the analysis is performed.

**Keywords:** Distribution network, Photovoltaic power plant

**1 UVOD**

Brz razvoj solarne industrije, povećanje efikasnosti solarnih ćelija, pad cene fotonaponskih (FN) panela i invertora, te razni načini podsticaja rezultovali su brzim i kontinuiranim povećanjem instalirane snage fotonaponskih elektrana (FNE) globalno [1].

Kako bi se smanjili gubici u prenosu električne energije, a time i troškovi, električna energija se počinje proizvoditi na mestu ili blizu mesta potrošnje. To se zove distributivna proizvodnja električne energije [2].

Jedan od glavnih problema obnovljivih izvora energije jeste nestabilnost i zavisnost od vremenskih prilika. Brze promene vremenskih uslova u toku dana mogu prouzro-

kovati varijabilnost proizvedene snage. Još jedan problem nastao velikom ekspanzijom solarnih elektrana jeste pokrivanje dnevnog pika u poslepodnevnim časovima za vreme zalaska sunca kada proizvodnja FN elektrana polako iščezava a potrošnja energije doseže svoj maksimum. Tada se pojavljuje velika razlika između potrošnje i proizvodnje koju je potrebno nadomestiti iz konvencionalnih izvora energije [3].

U drugom poglavlju pažnja se posvećuje osnovnim problemima prouzrokovanim povezivanjem FN elektrane na distributivnu mrežu (DM). Obrađuju se dva problema: "Duck curve" [4] i varijabilnost snage [5].

Treće poglavlje se bavi strategijama u cilju suzbijanja prethodno navedenih problema koji nastaju priključenjem FNE na DM.

U četvrtom poglavlju prikazani su rezultati proračuna dobijeni na primeru jednostavne test mreže. Na osnovu dobijenih rezultata vrši se analiza.

U petom poglavlju dat je zaključak o prednostima i manama priključenja FNE na DM na osnovu teorijskih razmatranja i prikazanih rezultata. Nakon zaključka referentno je navedena literatura korišćena za realizaciju ovog rada.

**2 POSTAVKA PROBLEMA**

U ovom delu je prikazan problem integracije FNE na DM. Pritom, razmatraju se dva osnovna problema FNE: varijabilnost proizvodnje i "Duck Curve".

**2.1 Problem varijabilnosti proizvodnje FNE**

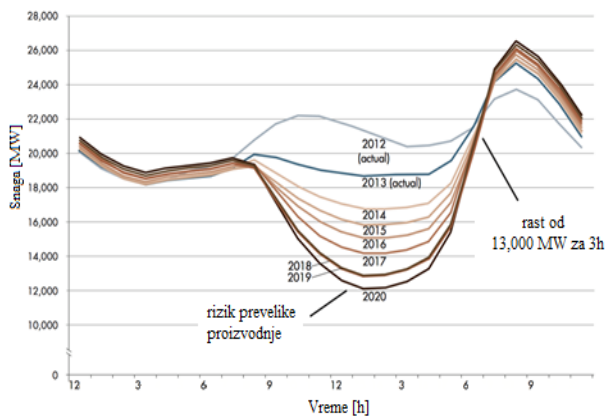
Varijacije u proizvodnji FNE zavise od promena intenziteta sunčevog zračenja [5], koje se menja pre svega usled kretanja oblaka (temperatura, brzina vetra i vlažnost, ne uzrokuju značajne varijacije u proizvodnji). Tako izazvane varijacije injektirane snage u mrežu imaju negativan uticaj na kvalitet i pouzdanost sistema. Skladišta električne energije su jedno od pouzdanih rešenja za smanjenje varijacija snage ispod dozvoljene vrednosti [5].

**2.2 Duck curve**

U ovom delu, razmatra se dnevni dijagram opterećenja specifičnog oblika, poznat kao "Duck Curve" [4]. Oblik dijagrama ukazuje na potencijal za prekomernu proizvodnju, koja se javlja usled sve veće penetracije FNE.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor bio dr Goran Švenda, red. prof.



Slika 1. Duck Curve [4]

Na slici 1, za period 2012-2020, prikazani su dijagrami ukupnog opterećenja sistema – ukupna potrošnja umanjena za proizvodnju (umanjeno za energiju koja se proizvodi uz pomoću vetro i solarnih elektranama). Može se uočiti značajno smanjenje vrednosti dijagrama ukupnog opterećenja sistema za svaku narednu godinu. Konačno, za 2020. godinu izvršena je procena rizika od prekomerne proizvodnje. Glavni problem nastaje u poslepodnevnim časovima za vreme zalaska sunca kada je proizvodnja FNE polako iščezava a potrošnja energije doseže svoj maksimum. Tu razliku koja nastaje između zahtevane i proizvedene snage potrebno je nadomestiti iz konvencionalnih izvora energije. Oni zahtevaju više vremena za stupanje u pogon pre nego što budu iskorišćeni, stoga moraju da proizvode minimum izlazne snage u periodima kada to nije potrebno. To predstavlja glavni problem za operatore mreže sa puno FNE [4].

### 3 STRATEGIJE ZA REŠAVANJE PROBLEMA

U ovom delu prikazane su strategije i algoritmi čijom primenom se mogu izravnati dijagrami opterećenja i varijacija snage. U [6] su date strategije za promenu izgleda Duck Curve i izravnjanja dijagrama opterećenja.

#### 3.1 Strategije za rešavanje Duck curve

U ovom delu razmatra se oblik Duck Curve i strategije za smanjenje i preraspodelu opterećenja [6]. Razmatrane su sledeće strategija za pokrivanje velikih potreba za energijom:

1. Strategija – Energetska efikasnost u časovima naglog porasta opterećenja
2. Strategija – Korišćenje i raspodela obnovljivih izvora u vreme maksimalnog opterećenja
3. Strategija – Upravljanje distribucijom vode i ispuštanja otpadnih voda
4. Strategija – Kontrolisanje električnih grejača vode
5. Strategija – Upotreba skladišta leda umesto klima uređaja
6. Strategija – Promena opterećenja uvođenjem tarifnog sistema
7. Strategija – Raspodela skladišta električne energije na određene lokacije
8. Strategija – Implementirati programe za regulisanje potrošnje energije
9. Strategija – Korišćenje međuregionalne razmene

energije

10. Strategija – Povlačenje iz upotrebe nefleksibilnih i neisplativih elektrana

Navedene strategije ne podrazumevaju samo integraciju obnovljivih izvora, već i povećanje pouzdanosti sistema, smanjenje cene proizvodnje i prenosa energije, kao i cene goriva [6].

#### 3.2 Strategije za rešavanje varijabilnosti snage

Varijabilnost sunčevog zračenja kojima su uzloženi FN paneli prouzrokovana je kretanjem oblaka. Na osnovu promenljivosti sunčevog zračenja javljaju se brze promene u proizvodnji FNE. Povećavanje udela FNE u mreži može prouzrokovati negativne uticaje na kvalitet i pouzdanost. Iz tog razloga skladišta energije su neophodna da smanje oscilacije snage FNE ispod dozvoljene vrednosti. Instalacija skladišta energije ima veliki uticaj na energetske-ekonomsku isplativost FN sistema za koje se smatra da će imati ključnu ulogu u održivosti FN sistema. U ovom delu predlažu se tri kontrolne strategije za rešavanje problema varijabilnosti snage [7]:

1. Ramp rate
2. Moving average
3. Step rate

Jednogodišnja simulacija navedenih strategija pokazala je mane i prednosti svake od kontrolnih strategija. Moving average strategija zahteva najmanji kapacitet skladišta energije, međutim povećanjem gubitaka od 2-3 puta gube se ti benefiti. Ramp rate strategija ima manje gubitke ali zahteva najveći kapacitet skladišta energije. Detaljna analiza isplativosti za svaki slučaj pojedinačno predstavlja najbolje rešenje. Analiza treba obuhvatiti uticaj broja ciklusa punjenja/praznjenja i stanja napunjenosti baterije na izabrano skladište. Strategija Step rate predstavlja najbolje rešenje za većinu razmatranih slučajeva, jer omogućuje najefikasnije korišćenje sistema za skladištenje energije, sa manjim brojem ciklusa punjenja/praznjenja i smanjenim gubicima [7].

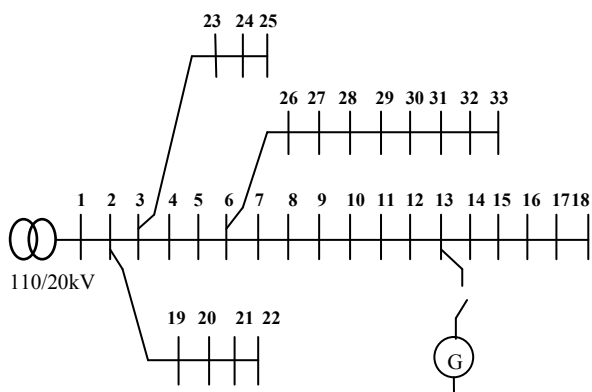
### 4 PRIMER PRORAČUNA

Na primeru test mreže prikazane su prednosti i mane priključenja FNE na DM. Prvo se razmatra uticaj priključenja FNE na DM, a zatim i uticaj energetskih skladišta. Pritom deo energije proizvedene iz FNE skladišti se u energetskim skladištima i upotrebljava u večernjim časovima kada je potrošnja najveća. Rezultati su dobijeni na osnovu matematičkog modela razvijenog u C# programskom jeziku.

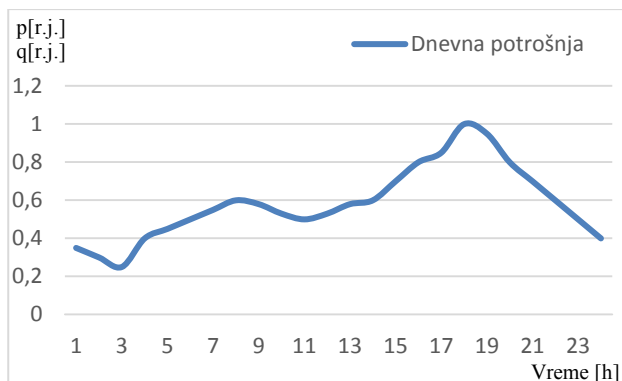
#### 4.1.1 Jednostavna test mreža

Analize su izvršene na IEEE test mreži [8], slika 2, za koju su poznati parametri i vrednosti potrošnje potrošača, slika 3 i proizvodnje FNE slika 4. Proračunom tokova snaga dobijene su vrednosti gubitaka aktivne snage i snage preuzete od prenosne mreže. Posebno su razmatrana dva trenutka:

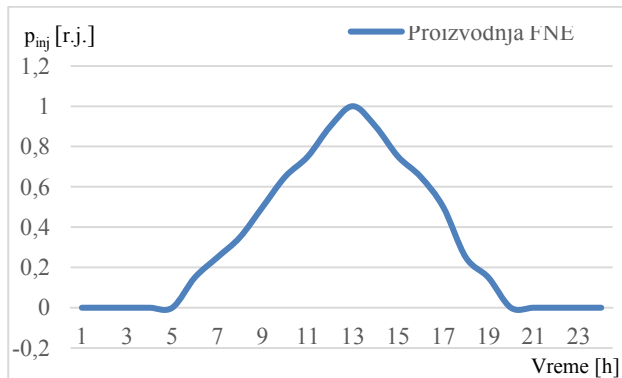
- 1) 18h – maksimalno opterećenje mreže i
- 2) 13h – maksimalna proizvodnja FNE.



Slika 2. Test mreža [8]



Slika 3. Koficijenti potrošnje DM



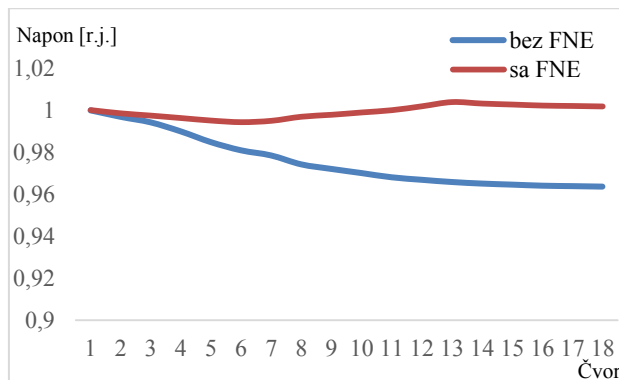
Slika 4. Koficijenti proizvodnje FNE

#### 4.2 Prikaz rezultata u 13h

Maksimalna proizvodnja FNE se desila u 13h. Priključenjem FNE gubici test mreže su smanjeni sa 0.131 MW na 0.058 MW. Snaga potrebna iz prenosne mreže smanjuje se sa 3.714 MW na 2.372 MW, tabela 1. Značajno smanjenje gubitaka u DM povezano je sa proizvodnjom električne energije u neposrednoj blizini njene potrošnje. Priključenjem FNE značajno su popravljene i naponske prilike u celoj mreži, slika 5.

Tabela 1. Rezultati proračuna u 13h

	bez FNE	sa FNE
Gubici u mreži [MW]	0.131	0.058
Snaga potrebna iz prenosne mreže [MW]	3.714	2.372



Slika 5. Profil naponska sa i bez FNE, u 13h

#### 4.3 Prikaz rezultata u 18h

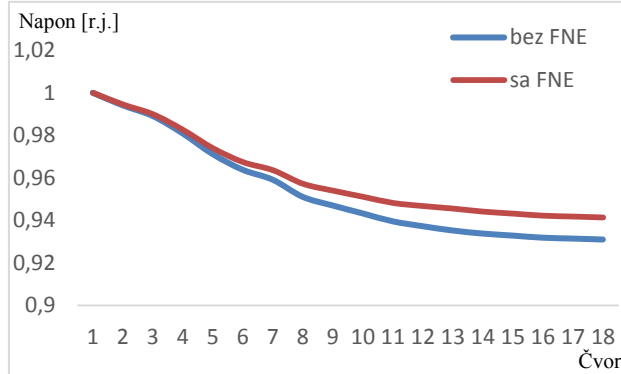
Maksimalna potrošnja DM se desila u 18h. U ovom režimu, priključenjem FNE gubici test mreže su smanjeni sa 0.410 MW na 0.334 MW.

Snaga potrebna iz prenosne mreže smanjuje se sa 6.508 MW na 6.140 MW, tabela 2.

Iako je proizvodnja FNE u 18h znatno manja od svoje maksimalne, postiže se značajno smanjenje gubitaka u mreži. Priključenjem FNE popravljene su i naponske prilike u celoj mreži, slika 6.

Tabela 2. Rezultati proračuna u 18h

	bez FNE	sa FNE
Gubici u mreži [MW]	0,410	0,334
Snaga potrebna iz prenosne mreže [MW]	6,508	6,140



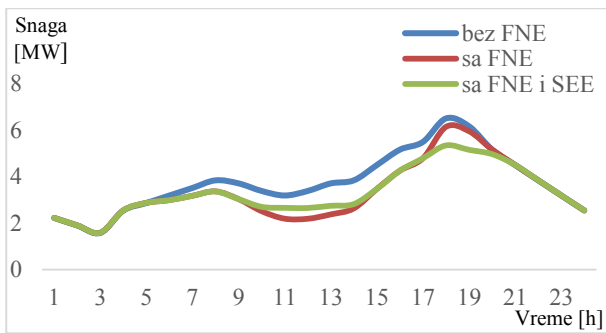
Slika 6. Profil napona DM sa i bez FNE u 18h

#### 4.4 Prikaz dnevnih dijagrama

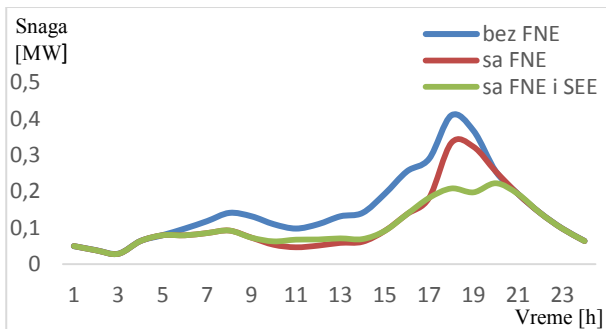
Osim primera DM sa i bez FNE, razmatran je i primer sa skladištem električne energije (SEE) koje je postavljeno neposredno uz FNE.

Na slikama 7 i 8 prikazani su dnevni dijagrami potrošnje i gubitaka aktivne snage, respektivno (na dijagramima su prikazane vrednosti režima test mreže bez FNE, sa FNE i sa FNE i SEE).

U test mreži sa FNE i SEE deo proizvodnje FNE se injektira u mrežu, a deo se skladišti u SEE i iz njega u poslepodnevnim časovima injektira u mrežu.



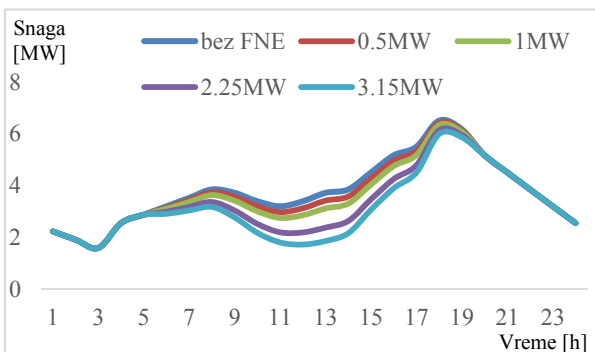
Slika 7. Dnevni dijagram potrošnje



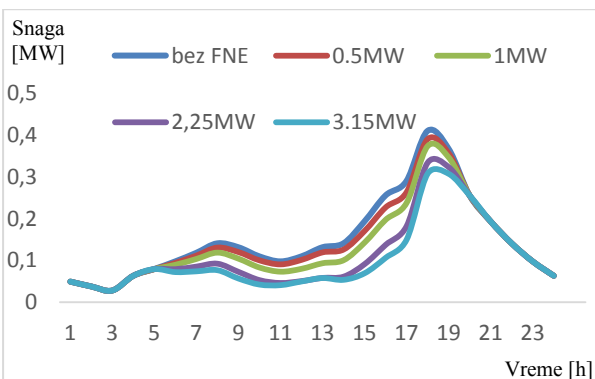
Slika 8. Dnevni dijagram gubitaka aktivne snage

#### 4.5 Uticaj veličine FNE

Povećavanjem kapaciteta FNE u test mreži raste problem "Duck curve". Na slikama 9 i 10 prikazani su dnevni dijagrami potrošnje i gubitaka aktivne snage u zavisnosti od veličine FNE, respektivno (na dijagramima su prikazane vrednosti režima test mreže bez FNE i sa FNE vršne snage 0.5MW, 1MW, 2.25MW i 3.15MW).



Slika 9. Dijagram potrošnje u zavisnosti od snage FNE



Slika 10. Dijagram gubitaka u zavisnosti od snage FNE

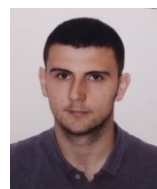
## 5 ZAKLJUČAK

Distributivni generatori zasnovani na suncu i vetru nisu upravljivi u smislu kontrolisane promene aktivne snage. Priključenjem FNE u DM mogu da se ostvare mnoge prednosti, kao npr. bolje naponske prilike i smanjenje gubitaka distributivne mreže. Ali istovremeno njihovim priključenjem u DM mogu da se dese i neželjene pojave, kao što su npr. Duck curve i varijacije izlazne snage. Navedeni problemi se uspešno rešavaju primenom električnih skladišta energije. Visoka cena i realtivno mali kapaciteti sprečavaju njihovu širu primenu u današnjim DM. U budućnosti se očekuje njihov razvoj koji će uticati na povećanje kapaciteta i smanjenje cena a samim tim i na širu primenu.

## 6 LITERATURA

1. H.Wirth: *Recent Facts about Photovoltaics in Germany*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, January 2017.
2. D.Pajan: *Utjecaj solarne elektrane na mrežu u točki priključenja*, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2016.
3. K.Brellas: *Modeling of Hybrid Operation of a Concentrated Solar Power production unit*, Technical University of Crete, Chania, Greece, 2017.
4. <https://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelpRenewablesFastFacts.pdf>.
5. S.Vodopija: *Prognoziranje proizvodnje iz OIE i upravljanje distribuiranim sustavima za skladištenje električne energije u elektroenergetskoj mreži u tržišnim uvjetima*, doktorski rad, Sveučilište u Splitu, Split, 2017.
6. J.Lazar: *Teaching the Duck to Fly*, Second Edition. Montpelier, VT: The Regulatory Assistance Project, 2016.
7. J.Marcos, I.Parra, M.Garcia, L.Marroyo: *Control strategies to smooth short-term power fluctuations in large photovoltaic plants using battery storage systems*, Article, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Navarre, Pamplona, Spain, 2014.
8. A.Ulinuha, M.A.S.Masoum, S.M.Islam: *Optimal scheduling of LTC and shunt capacitors in large distorted distribution systems using evolutionary-based algorithms*, IEEE Trans. on PWRD, vol. 23, Issue: 1, Jan. 2008.

### Kratka biografija:



**Igor Bjelica** rođen je u Novom Sadu 1994. godine. Osnovne studije završio na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i Računarstvo – Elektroenergetski sistemi 2017. god. i 2017. god. upisao master studije na istom fakultetu.