

# Določitev parametrov regulabilnih naprav v EES – primer preprečevanja preobremenitev zaradi stohastike OVE

Jure Bevc, Miloš Pantoš, Jerneja Bogovič, Rafael Mihalič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: jure.bevc@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** V elektroenergetskem sistemu Slovenije (v nadaljevanju EES) se je v zadnjem desetletju delež obnovljivih virov energije (v nadaljevanju OVE) začel povečevati. Največji porast na novo priključenih elektrarn je zaznan pri sončnih elektrarnah. Njihova skupna inštalirana moč je do leta 2021 znašala 466,24 MW [1]. Zaveza članic EU nakazuje, da bo tako tudi v prihodnje, saj je to izbrani način nadomeščanja fosilnih goriv in prehoda na tako imenovano brezogljeno proizvodnjo električne energije. V Sloveniji načrtujejo izgradnjo novih hidroelektrarn, vetrnih polj in v skladu z načrtom REPowerEU tudi sončnih elektrarn, katerih priključna moč v EES naj bi se do leta 2030 na ravni EU povečala za skoraj 600 GW [2].

Dokler je bil delež OVE nizek, smo njihov vpliv na elektroenergetsko omrežje (v nadaljevanju EEO) zanemarili. Ker se do leta 2030 napoveduje skokovit porast inštalirane moči OVE, pa je treba to upoštevati v izračunih, ki jih uporabljamo pri načrtovanju EES. Povečana proizvodnja iz OVE lahko povzroči preobremenitve vodov in dvig napetosti vozlišč nad dovoljeno mejo. Operaterji omrežja težave rešujejo s stikalnimi manevri, z uporabo transformatorskih naprav in naprav FACTS (*angl. Flexible alternating current transmission system*) ali s prerazporejanjem proizvodnje in porabe (*angl. Generation and load redispatching*), kar pa velja za zelo drago rešitev.

Članek obravnava skupno angažiranje regulabilnih naprav pri zagotavljanju določenega kriterija, bodisi je to amplituda vozliščne napetosti ali obremenitev vodov. Rešitev temelji na uporabi metode, ki modelira regulabilne naprave v stacionarnem stanju eksterno glede na podrejen program izračuna pretokov energije (v nadaljevanju IPE) [3]. Uporabnost metode smo predstavili na primeru skupine prečnih transformatorjev (v nadaljevanju PST), ki jih uporabimo za razbremenjevanje kritično obremenjenih delov EEO. PST so vrsta transformatorskih naprav, ki lahko uravnavajo razliko kotov med dvema vozliščema in s tem pretok delovne energije v izbrani veji. Posledično se spremenijo tudi pretoki sosednjih vej. Zaradi tega je ključno koordinirano obratovanje vseh regulabilnih naprav v omrežju. Pri prekoračitvi dopustne obremenitve voda smo izračunali fazne zamike vseh PST v EES in z njihovim skupnim angažiranjem omejili pretok delovne energije na izbranih vodih.

**Ključne besede:** elektroenergetski sistem, obnovljivi viri energije, prečni transformator, pretoki energije

## Determining parameters of adjustable EPS devices – an example of preventing overloads due to stochastic renewable energy sources

In the Slovenian electric power system (EPS), the share of renewable energy sources (RES) has been increasing in the last decade. The largest increase is due to the newly connected solar power plants. In 2021, their total installed capacity was 466,24 MW [1]. The trend is believed to continue also in future as a result of the transition to low – carbon energy. Slovenia plans to build new hydro power plants, wind farms, and according to the REPowerEU plan, also solar power plants whose connected power will in the EU increase by almost 600 GW by 2030 [2]. The impact of such an enormous increase on the future EPS stability should be taken into account because of its overloading the power lines and increasing the node voltage. The problem can be solved by switching maneuvers, transformer devices, flexible alternating current transmission devices, or by redistributing the power production and consumption, i.e.

generation and load redispatching, which is a very expensive solution. The paper proposes a method of a collective use of controllable devices in providing a certain criterion, either the nod voltage amplitude or the line load. The method which models controllable devices in a stationary state compliantly with the load flow routine [3] is demonstrated on a group of phase-shifting transformers (PST) to relieve critically loaded line parts. PST is a transformer that controls the angle difference between two nodes i.e. the power flow in a particular branch, which affects the power flow in adjacent nodes. A coordinated operation of controllable devices in the power system is of a great importance. When load on a line exceeds its limit value, the phase angle of any PST is calculated using the proposed method in order to limit the power flow in menaced lines.

**Keywords:** power system, renewable energy sources, phase-shifting transformer, power flow

## 1 UVOD

V zadnjem desetletju se predvsem v Evropi na področju energetike največ pozornosti posveča prehodu na t. i. brezogljično družbo. To naj bi glede na politično agendo oskrbe EU z energijo dosegli s prehodom s fosilnih na tako imenovane obnovljive vire energije, ki med obratovanjem nimajo emisij.

Po podatkih Statističnega urada Republike Slovenije znaša delež energije iz obnovljivih virov v bruto končni porabi energije v Sloveniji 25 % [4]. Priključevanje OVE je v porastu zlasti od leta 2018, predvsem zaradi priključevanja velikega števila malih sončnih elektrarn. Leta 2017 je inštalirana moč vseh sončnih elektrarn priključenih v distribucijsko omrežje znašala 267 MW, leta 2021 pa že 466,24 MW [1].

Zaradi povečane proizvodnje električne energije na nizkonapetostni strani, pri porabniku, se lahko spremenijo pretoki električne energije. Povečana proizvodnja iz OVE lahko povzroči preobremenitve vodov in probleme z napetostjo. V prihodnje je glede na napovedi obstoječe vlade pričakovati tudi pospešeno izgradnjo velikih enot OVE, ki bodo priključene na visokonapetostno omrežje. Zaradi vsega omenjenega je OVE treba upoštevati pri načrtovanju in analizi prihodnjih stanj EES, katerih temelj so med drugim izračuni pretokov energije (v nadaljevanju IPE).

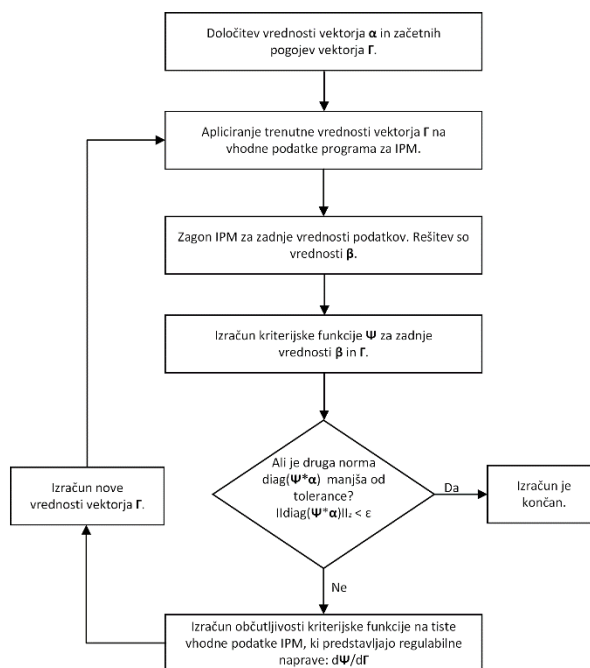
Nedavno je bila na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani razvita metoda [3], ki omogoča izračune pretokov energije v EES z vključenimi tako rekoč poljubnimi tipi regulabilnih naprav (recimo naprave FACTS) in z njimi povezanimi zahtevami za reguliranje parametrov EES. Prednost metode je, da uporablja standardne programe za IPE, ne da bi bilo treba modele omenjenih naprav oz. njihovih možnosti regulacije parametrov EES integrirati v njihovo programsko kodo. Metoda zaradi uporabe Newtonove metode izkazuje nizko število iteracij za tiste primere, za katere konvergira in v primerjavi s konvencionalnim izračunom konvergira na širšem področju [3]. Uporabnost metode smo demonstrirali na reševanju problema preobremenitev s koordiniranim obratovanjem PST v EES. Pri tem napetost vozlišč ni predmet obravnave. V principu bi lahko v metodi upoštevali tudi kriterij omejitve amplitude napetosti vozlišč, vendar PST za to niso najbolj primerni. V tem primeru bi bilo namesto njih smiselno uporabiti klasične transformatorje z odcepi ali ustrezne naprave FACTS.

## 2 KOORDINIRANO OBRATOVANJE REGULABILNIH NAPRAV

Ker je EES povezana celota, se sprememba moči na enem vodu odrazi v spremembi moči na vseh sosednjih. Z dodajanjem večjega števila regulabilnih naprav v EES je smiselno razmišljati o njihovem usklajenem delovanju.

Pri nastopu preobremenitve elementa v EEO lahko vsaka regulabilna naprava prispeva svoj delež k njegovemu razbremenjevanju. V kolikšni meri naj bo pri

tem udeležena, lahko določimo s pomočjo algoritma, ki je prikazan na sliki 1, razlaga pa sledi v nadaljevanju.



Slika 1: Grafični prikaz delovanja metode koordiniranega obratovanja regulabilnih naprav.

V osnovi gre za metodo, ki modelira regulabilne naprave v stacionarnem stanju eksterno glede na podrejeni program IPE [3]. Bistvo te je, da z dodajanjem novih naprav ne posegamo v program IPE. Zaradi te lastnosti je metoda kompatibilna s katerimkoli algoritmom za IPM, tudi s komercialnimi rešitvami, ki vsebujejo zaprtokodne programe, ki onemogočajo kakršnekoli prilagoditve, na primer dodajanje modelov poljubnih regulabilnih naprav v rutine za IPE. Metoda vsako regulabilno napravo opiše s spremenljivkami, ki definirajo njeno stanje in lastnosti, ter jih shrani v vektor  $\Gamma$ .

$$\Gamma = [\gamma_1; \gamma_2; \dots; \gamma_n; \dots; \gamma_N] \quad (1)$$

Za izračun njegove vrednosti je treba konstruirati pripadajoče enačbe, ki opišejo delovanje regulabilnih naprav. Za delovno moč na vodu, v katerega je vključen PST, velja:

$$P_{ij} = -U_i \cdot U_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij}) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij})) + U_i^2 \cdot G_{ij} \quad (2)$$

Iz enačbe (2) vidimo, da PST opišemo z eno neznancko, to je faza transformatorja ( $\varphi_{ij}$ ). Pri tem sta  $U_i$  in  $U_j$  amplitudi napetosti vozlišč  $i$  in  $j$ ,  $\delta_i$  in  $\delta_j$  kota napetosti vozlišč  $i$  in  $j$ ,  $G_{ij}$  in  $B_{ij}$  pa konduktanca in susceptanca voda med vozliščema  $i$  in  $j$ . Če gre za nelokalno ali posplošeno regulacijo, se enačba za moč na opazovanem vodu spremeni.

$$P_{ij} = -U_i \cdot U_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)) + U_i^2 \cdot G_{ij} \quad (3)$$

Število spremenljivk, ki jih regulabilne naprave vnesejo v izračun, mora biti enako številu regulacijskih pogojev ( $N=M$ ). Neznanka PST je ena sama, faza transformatorja. Regulacijski pogoj lahko zapišemo kot:

$$\psi_m = |P_{ij}| - P_{ij, \text{set}} \quad (4)$$

V enačbi (4)  $P_{ij, \text{set}}$  predstavlja zgornjo vrednost delovne moči, s katero lahko obremenimo vod  $i$ - $j$ . Metoda vse regulacijske pogoje vstavi v vektor  $\Psi$ , ki ga imenujemo kriterijska funkcija. Splošni zapis se glasi:

$$\Psi = [\psi_1; \psi_2; \dots; \psi_m; \dots; \psi_M] \quad (5)$$

Pri koordiniranem obratovanju v primeru kršitve enega regulacijskega pogoja sodelujejo vse regulabilne naprave v EES. Pogoj za pravilno modeliranje kriterijske funkcije je:

$$\text{diag}(\Psi(\Gamma, \beta, \theta) \cdot \alpha^T) = 0 \quad (6)$$

Pri metodi koordiniranega obratovanja regulabilnih naprav iščemo takšni vrednosti vektorja  $\Gamma$  in  $\beta$ , da bodo elementi glavne diagonale produkta kriterijske funkcije in vektorja  $\alpha$  enaki nič. V vektorju  $\beta$  so zajete vse spremenljivke klasičnega IPE v obliki vozliščnih enačb, v vektorju  $\theta$  pa vsi parametri EES, ki v izračunu ostajajo konstantni. Stolpični vektor  $\alpha$  vsebuje informacijo o kršenih regulacijskih pogojih. Vrednost posameznega elementa v vektorju  $\alpha$  je 0, če opazovani regulacijski pogoj ni kršen, in 1, če je kršen. Tako v primeru PST pri izračunu kriterijske funkcije v posamezni iteraciji upoštevamo le tiste prispevke, pri katerih je obremenitev opazovanega voda večja od omejitve.

$$\alpha_m = \begin{cases} 0; & \psi_m \leq 0 \\ 1; & \psi_m > 0 \end{cases}, m = \{1, 2, \dots, M\} \quad (7)$$

Predlagana metoda koordinacije regulabilnih naprav temelji na Newtonovi iterativni metodi in izkazuje izjemno hitro konvergenco [3]. Zanj je značilen razvoj kriterijske funkcije v Taylorjevo vrsto. Če v njej upoštevamo zgolj prva člena, lahko rešitev poiščemo z nastavkom:

$$\Gamma^{(k+1)} = \Gamma^{(k)} + \left( \frac{d\Psi(\Gamma^{(k)})}{d\Gamma^{(k)}} \right)^{-1} \cdot \text{diag}(\Psi(\Gamma^{(k)}) \cdot \alpha) \quad (8)$$

Ker je vektor  $\Psi$  funkcija več spremenljivk, občutljivost  $\Psi$  po vektorju  $\Gamma$  zapišemo kot:

$$\frac{d\Psi}{d\Gamma} = \frac{\partial\Psi}{\partial\Gamma} - \frac{\partial\Psi}{\partial\beta} \cdot \left( \frac{\partial\Lambda}{\partial\beta} \right)^{-1} \frac{\partial\Lambda}{\partial\Gamma} \quad (9)$$

Iterativni izračun je končan, ko velja:

$$\|\text{diag}(\Psi \cdot \alpha^T)\|_2 < \varepsilon \quad (10)$$

### 3 PRIMER UPORABE METODE

Uporabnost metode s koordiniranim obratovanjem regulabilnih naprav smo pokazali na primeru EES IEEE 118, slika 2. Vanj smo vstavili pet PST in izbrali pet vodov, ki smo jim določili največje dovoljene obremenitve, kot navaja tabela 1.

Tabela 1: Maksimalne moči na opazovanih vodih.

Začetno vozlišče	Končno vozlišče	Največja dovoljena obremenitev voda (MW)
17	15	110,00
49	47	70,00
61	60	130,00
80	79	120,00
100	103	130,00

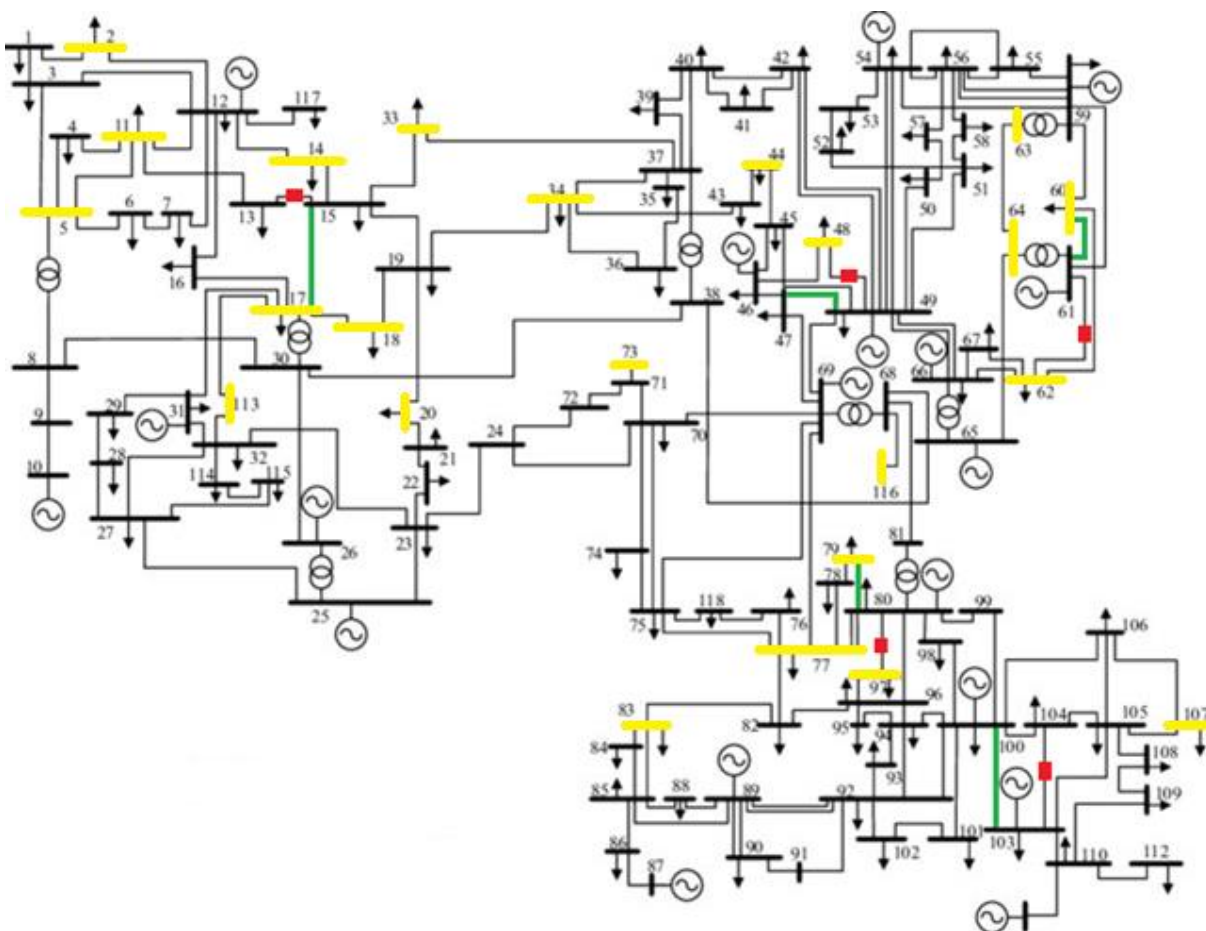
V EES smo na 23 mest vstavili OVE z močjo 10 MW. Vizualizacija omrežja je predstavljena na sliki 2. Rdeči pravokotniki predstavljajo lokacijo PST-jev, z zeleno barvo so označeni vodi, katerih pretok želimo omejiti v primeru preobremenitve, z rumeno barvo pa so označena vozlišča, kamor smo dodali OVE.

PST je v osnovi namenjen reguliranju pretokov delovne moči v veji, kjer je priključen v EES. Ker pa se zaradi povezanosti vozlišč sprememba pretoka v enemvodu odraža tudi na sosednjih, lahko za kriterijsko funkcijo izberemo poljuben vod v EES. To, koliko lahko s katerim PST vplivamo na pretoke energije v posameznih vejah, je odvisno od strukture in parametrov EEO. V splošnem velja, da bolj je EEO zazankano, hitreje z električno razdaljo pada njegov vpliv, na radialne dele EEO pa sploh ne vpliva.

Pri regulaciji delovne moči na opazovanem vod, ki ni lasten PST, se enačba (9) poenostavi. Odvod kriterijske funkcije po spremenljivkah regulabilnih naprav je enak nič, zato lahko za občutljivost kriterijske funkcije zapišemo izraz:

$$\frac{d\Psi}{d\Gamma} = - \frac{\partial\Psi}{\partial\beta} \cdot \left( \frac{\partial\Lambda}{\partial\beta} \right)^{-1} \frac{\partial\Lambda}{\partial\Gamma} \quad (11)$$

Angažiranje PST se opravi po izračunu pretokov delovne energije in primerjavi z omejitvami na posameznih vodih. Če je katera izmed omejitev presežena, bo program aktiviral PST in z njihovim skupnim angažiranjem odpravil preobremenitev v opazovanem vod.



Slika 2: IEEE 118 [5] z dodanimi OVE in PST.

Generatorjem v EES s slike 2 smo povečali moč za 20 % in 40 % ter to pripisali povečevanju OVE v EES. Ker velikost bremen v EES nismo spreminjali, je za izravnano odstopanja bilance moči v iteracijskem izračunu poskrbelo vozlišče 69 – bilančno vozlišče. Spremembe v pretokih moči in faznih zamikih PST, ki so bili angažirani, smo predstavili v spodnjih tabelah.

Obratovalno stanje EES, v katerem ni dodatnega povečanja moči generatorjev zaradi povečanja OVE, je prikazano v tabeli 2.

Tabela 2: Obremenitve na opazovanih vodih pred priključevanjem OVE.

Začetno vozlišče	Končno vozlišče	Moč na vodu (MW)
17	15	103,86
49	47	9,54
61	60	112,07
80	79	64,74
100	103	121,75

Iz tabele 2 vidimo, da nobena od opazovanih vej ni preobremenjena, zato tudi ni potrebe po aktivaciji PST. Pri povečanju moči generatorjev za 20 % dobimo v EES razmere, predstavljene v tabeli 3.

Tabela 3: Obremenitve na opazovanih vodih, pri 20-odstotnem povečanju moči generatorjev.

Začetno vozlišče	Končno vozlišče	Moč na vodu pred aktivacijo PST (MW)	Moč na vodu po aktivaciji PST (MW)
17	15	106,59	106,59
49	47	59,68	59,69
61	60	99,93	99,93
80	79	91,30	91,31
100	103	<b>133,31</b>	130,00

Pri povečanju moči generatorjev za 20 % smo presegli omejitev delovne moči na vodu 100–103. Zaradi tega je program omejil pretok v tej veji na maksimalno vrednost z angažiranjem PST v EES.

Tabela 4: Fazni zamiki PST pri 20-odstotnem povečanju moči generatorjev.

PST	Fazni zamik (°)
13–15	-0,0000
48–49	-0,0001
61–62	0,0000
80–97	0,0016
103–104	1,0783

Iz tabele 4 vidimo, da bo prispevek PST bližje vodu, ki je presešel dovoljeno obremenitev, večji v primerjavi s tistimi, ki so, električno gledano, od tega voda daleč. Ker gre za teoretičen izračun, smo rezultate zaokrožili na štiri decimalna mesta natančno. Zavedati pa se je treba, da v praksi faznih zamikov PST ni mogoče tako natančno nastaviti.

Obstajajo tudi druge rešitve, saj lahko delovno moč na izbranem vodu omejimo z različnimi kombinacijami faznih zamikov PST. Opisana metoda poda zgolj eno rešitev, če ta obstaja. Zaradi Newtonove iterativne metode sta obstoj in vrsta rešitve izračuna odvisna od izbire začetnih vrednosti v vektorju  $\Gamma$ . Te smo izbrali tako, da je bil vpliv regulabilnih naprav na EES v prvi iteraciji IPE čim manjši. Z izbiro začetnih vrednosti je povezana tudi hitrost izračuna. V primeru povečanja moči generatorjev za 20 % smo do rešitve prišli v 6 iteracijah.

Pri povečanju moči generatorjev v EES za 40 % presežemo mejo dopustne prenesene delovne energije na vodih 17–15 in 49–47. Obremenitve vodov pred aktivacijo PST in po njej prikazuje tabela 5.

Tabela 5: Obremenitev na opazovanih vodih, pri 40-odstotnem povečanju moči generatorjev.

Začetno vozlišče	Končno vozlišče	Moč na vodu pred aktivacijo PST (MW)	Moč na vodu po aktivaciji PST (MW)
17	15	<b>113,35</b>	110,00
49	47	<b>100,60</b>	70,00
61	60	97,34	97,58
80	79	119,74	119,56
100	103	125,67	125,67

Program koordiniranega obratovanja PST je pri povečanju moči generatorjev za 40 % rešitev poiskal v 12 iteracijah in predlagal aktiviranje PST s faznimi zamiki, kot je prikazano v tabeli 6.

Tabela 6: Fazni zamiki PST pri 40-odstotnem povečanju moči generatorjev.

PST	Fazni zamik (°)
13–15	-1,9528
48–49	12,8928
61–62	-0,0197
80–97	0,2086
103–104	-0,0001

#### 4 ZAKLJUČEK

Trend preoblikovanja EES stremi k povečevanju deleža OVE. Ker je cilj EU povečati število sončnih elektrarn na porabniški strani omrežja, bo to vplivalo na spremembo njegove obremenitve. V članku opisana metoda koordiniranega obratovanja regulabilnih naprav temelji na metodi modeliranja regulabilnih naprav v stacionarni analizi elektroenergetskega sistema. Metoda omogoča vključevanje regulabilnih naprav v analize IPE brez poseganja v program za IPE. Poleg tega omogoča izbiro poljubnega kriterija, ki naj bi bil z regulabilnimi napravami dosežen. V delu je delovanje metode predstavljeno na primeru nelokalne regulacije petih PST, kjer smo z njihovim koordiniranim obratovanjem povečali penetracijo OVE v EES.

#### LITERATURA

- [1] PVportal na spletu, <http://pv.fe.uni-lj.si/sl/podatki/porocila/> (1. 9. 2022).
- [2] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS REPowerEU Plan. 2022. Pridobljeno: 20. oktober 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>
- [3] G. Bone, "Posplošitev modeliranja regulabilnih elementov elektroenergetskega sistema pri analizi stacionarnih stanj," doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2018.
- [4] Statistični urad RS na spletu, <https://www.stat.si/StatWeb/News/Index/10057> (1.9.2022).
- [5] P. Fernandez-Porrás, M. Panteli, in J. Quiros-Tortos, »Intentional Controlled Islanding: When to Island for Power System Blackout Prevention«, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, maj 2018.
- [6] G. Bone in R. Mihalič, »Considering controllable devices using standard load flow programs – SSSC example«, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, let. 99, str. 355–362, jul. 2018.
- [7] G. Bone, M. Pantoš, R. Mihalič. »Newtonian Steady State Modeling of FACTS Devices Using Unaltered Power-Flow Routines«, *IEEE Transaction on Power System*, vol. 34, no. 2, pp. 1216–1226, 2019.
- [8] M. Pantoš, »Market-based congestion management in electric power systems with exploitation of aggregators«, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 121, pp. 1–10, 2020.

- [9] G. Bone in R. Mihalič, »Nova možnost modeliranja FACTS naprav v izračunih pretokov moči.« *13. Konferenca slovenskih elektroenergetikov, 22–24. Maj 2017, Maribor, Slovenija*. Dosegljivo: Cigre-Cired  
[https://www.cigre-cired.si/wp-content/uploads/2018/05/B4-08\\_2406.pdf](https://www.cigre-cired.si/wp-content/uploads/2018/05/B4-08_2406.pdf) t Word - [ClanekCIGRE.doc \(cigre-cired.si\)](#). [30. 9. 2022].

**Jure Bevc** je leta 2016 diplomiral, leta 2020 pa magistriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot raziskovalec v Laboratoriju za elektroenergetske sisteme na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo naprave FACTS v elektroenergetskem sistemu in metode izračuna pretokov energije.

**Miloš Pantoš** je leta 2001 diplomiral, leta 2005 pa doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlen je kot redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani in je vodja Laboratorija za elektroenergetske sisteme. Njegovo raziskovalno področje zajema delovanje, načrtovanje, vodenje in zaščito elektroenergetskega sistema, trg z električno energijo in sistemskimi storitvami.

**Jerneja Bogovič** je leta 2011 diplomirala, leta 2017 pa doktorirala na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Zaposlena je kot asistentka na isti fakulteti. Področje njenega raziskovalnega dela vključuje predvsem analizo elektroenergetskih omrežij in sistemov ter kazalnikov zanesljivosti.

**Rafael Mihalič** je leta 1986 diplomiral, leta 1989 magistriral in leta 1993 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani. Po diplomi je postal asistent na omenjeni fakulteti na Katedri za elektroenergetske sisteme in naprave. Med letoma 1988 in 1991 je bil zaposlen pri SIEMENS AG Erlangen na inštitutu za razdeljevanje električne energije in načrtovanje omrežij. Od leta 2005 je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Je član CIGRE, član IEEE, predsednik ŠK B4 SLOKO CIGRE. Področje njegovega delovanja vključuje predvsem analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS.