

# Izračun priključne zmogljivosti v distribucijskih omrežjih z optimizacijo rojev delcev in občutljivostnimi koeficienti

Klemen Knez, Leopold Herman, Boštjan Blažič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: kk3026@student.uni-lj.si

**Povzetek.** Vedno večje število novih tipov električnih odjemalcev, kot so toplotne črpalke, električni avtomobili, sončne elektrarne in baterijski hranilniki, sodobna distribucijska omrežja postavljajo pred velike izzive. Izzivi se pojavljajo tako na področju načrtovanja kot na področju obratovanja. Te naprave zaradi nepredvidljivosti v obratovanju že povzročajo težave pri nadzoru in vodenju distribucijskih omrežij. Največ se jih kaže na področju zagotavljanja ustreznega napetostnega profila in termične obremenitve elementov.

V prispevku je na podlagi simulacij realnega radialnega nizkonapetostnega distribucijskega omrežja predstavljen koncept priključne zmogljivosti distribucijskega omrežja, gledano s strani proizvodnih enot. Analizirani sta dve metodi, s katerima lahko opravimo izračun priključne zmogljivosti. Prva analizirana metoda je optimizacija z rojem delcev, druga metoda pa temelji na teoriji občutljivostnih koeficientov. Rezultati simulacij prikazujejo učinkovitost obeh metod. V okviru rezultatov je prikazano, da sta obe metodi določili delovne točke sončnih elektrarn ob upoštevanju obratovalnih kriterijev omrežja. Ne nazadnje se je metoda z občutljivostnimi koeficienti s svojo časovno nezahtevnostjo izkazala kot potencialno primernejša za osnovo algoritma za vodenje prožnosti odjema in proizvodnje v distribucijskih omrežjih.

**Ključne besede:** priključna zmogljivost, optimizacija z rojem delcev, teorija občutljivostnih koeficientov

## Power distribution network hosting capacity calculation using a particle swarm optimization and sensitivity coefficients

The increasing number of the new types of devices, such as heat pumps, electric cars, solar power plants and battery storage systems, are posing significant challenges to modern power distribution networks in terms of their planning and operation due to their unexpected impact. The devices are already causing disruptions in the control and management of power distribution grids. The most significant issues are related to maintaining a proper voltage profile and thermal load of the power network components.

The paper analyses the power distribution network hosting capacity from the perspective of production by simulating a real radial low-voltage distribution network. Two methods to calculate the hosting capacity are considered. The first is based on particle swarm optimization and the second is based on the sensitivity coefficients theory. Simulation results demonstrate the effectiveness of both methods. They determine the operating points of solar power plants while considering the network operational criteria. The latter method is promising in terms of its computational efficiency and ability to serve as a basis for the algorithms to manage the flexibility of the power consumption and production in the power distribution networks.

**Keywords:** hosting capacity, particle swarm optimization, sensitivity theory

## 1 UVOD

Zaradi elektrifikacije ogrevanja in prometa, priključevanja razpršenih virov električne energije, kjer prevladujejo predvsem sončne elektrarne, ter večanja deleža hranilnikov električne energije se elektroenergetski sistem (EES) danes sooča z velikimi spremembami. Te spremembe se v največji meri izražajo v nizkonapetostnih distribucijskih omrežjih, ki so bila v preteklosti načrtovana kot pasivno-porabniška omrežja. Proces preoblikovanja EES prinaša popolnoma novo vlogo odjemalcem električne energije, ki postajajo osrednji akterji pri obratovanju EES.

Vse prej omenjene naprave s svojim nekoordiniranim delovanjem operaterje distribucijskih omrežij postavljajo pred izzive na področju vzdrževanja ustreznega napetostnega profila znotraj celotnega omrežja in na področju preobremenitev elementov omrežja. Omenjene izzive lahko načrtovalci omrežij rešujejo s klasičnim načrtovalskim pristopom, ki vključuje predvsem zamenjavo obstoječih elementov omrežja, kot je zamenjava obstoječih vodnikov z vodniki večjega preseka. Alternativna rešitev je upoštevanje aktivnih odjemalcev, ki so sposobni prilagajati porabo in/ali proizvodnjo svojih na novo vgrajenih naprav.

Operaterji distribucijskih omrežij so dolžni zagotoviti ustrezne parametre kakovosti oskrbe z električno

energijo, kot jih določa standard SIST EN 50160 [1]. Eden od pomembnejših parametrov je ustrezen nivo napajalne napetosti, ki določa:

- vse 10-minutne povprečne učinkovne vrednosti napajalne napetosti morajo biti znotraj intervala  $U_n + 10 \% / - 15 \%$  in
- v vsakem opazovanem časovnem oknu dolžine enega tedna mora biti 95 % 10-minutnih povprečnih učinkovne vrednosti napajalne napetosti znotraj intervala  $U_n \pm 10 \%$ .

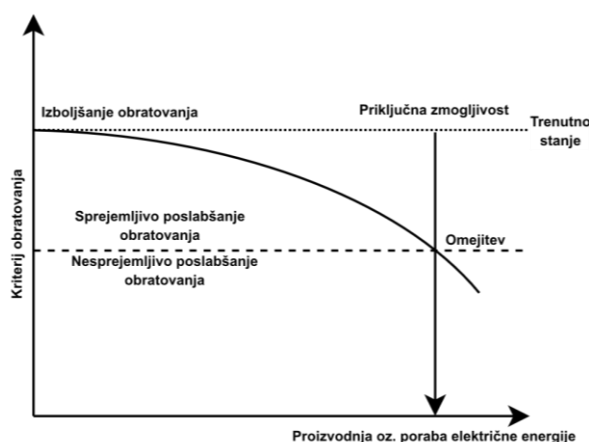
Operater mora upoštevati tudi termično obremenitev vseh elementov omrežja, ki je definirana s termičnim tokom elementa. Sistemska obratovalna navodila za distribucijsko omrežje električne energije predpisujejo, da se v normalnih obratovalnih razmerah kot mejna obremenitev nadzemnih vodov upošteva 50 % termičnega toka, pri kablinskih vodih pa 75 % termičnega toka [2].

V prispevku bosta s pomočjo simulacij ovrednoteni dve metodi, ki kot rezultat določita delovne točke sončnih elektrarn, katerih vsota hkrati predstavlja tudi priključno zmogljivost omrežja. Prvo metodo imenujemo optimizacija z rojem delcev, medtem ko druga metoda temelji na matriki občutljivostnih koeficientov. V članku po uvodu sledi predstavitev koncepta priključne zmogljivosti, nato sta v tretjem poglavju predstavljeni obe metodi. V četrtem poglavju so predstavljeni rezultati, pridobljeni z uporabo obeh v članku opisanih metod. V petem poglavju so opisani glavni zaključki prispevka.

## 2 PRIKLJUČNA ZMOGLJIVOST

V tem poglavju je na kratko opisan koncept priključne zmogljivosti. Predstavljene so metode, s katerimi lahko izračunamo priključno zmogljivost distribucijskega omrežja.

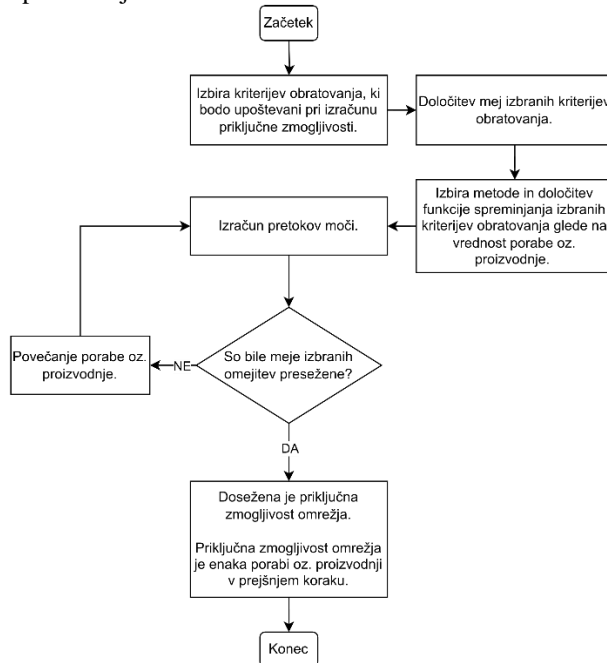
Za izračun fleksibilnosti aktivnih odjemalcev, ki je potrebna za zagotovitev obratovanja omrežja znotraj obratovalnih kriterijev, lahko uporabimo koncept priključne zmogljivosti, ki je bil prvič predstavljen leta 2004 v začetku projekta EU-DEEP [3]. Priključno zmogljivost omrežja lahko izračunamo na strani proizvodnje ali porabe. Tako na strani proizvodnje kot na strani porabe izračun upošteva obstoječo topologijo omrežja in kot rezultat vrne maksimalno vrednost dodatne proizvodnje oz. porabe električne energije, pri čemer niso kršeni obratovalni kriteriji izbranega omrežja. Na sliki 1 je shematično prikazano, da poslabšanje opazovanega obratovalnega kriterija ni neposredno zaskrbljujoče, dokler je končna kakovost tega kriterija v sprejemljivem območju. To pomeni, da za vsak obratovalni kriterij obstaja meja, ki je operater distribucijskega omrežja ne sme preseči.



Slika 1: Prikaz koncepta priključne zmogljivosti.

Izračuna priključne zmogljivosti distribucijskih omrežij se lahko lotimo z različnimi metodami, vsem pa je skupno, da temeljijo na izračunih pretokov moči. Izračuni kot rezultat podajajo vrednosti napetosti in tokov v distribucijskem omrežju. Čeprav se metode po načinu implementacije zelo razlikujejo, lahko koncepte vseh metod orišemo z diagramom poteka, prikazanim na sliki 2.

V nadaljevanju so na kratko opisane glavne lastnosti treh metod, in sicer deterministične, stohastične in optimizacijske metode.



Slika 2: Splošen diagram izračuna priključne zmogljivosti v distribucijskih omrežjih.

### 2.1 Deterministična metoda

Priključno zmogljivost distribucijskega omrežja z deterministično metodo izračunamo z znanimi vrednostmi proizvodnje in porabe vseh odjemalcev v omrežju [4]. Pri tej metodi torej naključnost ni vključena,

saj so informacije o porabi, proizvodnji in lokaciji posameznih odjemalcev definirane pred izračunom. Za metodo sta značilni majhna kompleksnost in velika časovna potratnost, medtem ko je njen rezultat samo približno natančen. Deterministično metodo v literaturi nadalje delijo na metodo konstante proizvodnje oz. porabe in metodo s časovnimi vrstami [4].

## 2.2 Stohastična metoda

Proces načrtovanja distribucijskega omrežja vključuje veliko neznank, saj načrtovalec omrežja ne ve, koliko odjemalcev se bo odločilo za elektrifikacijo ogrevanja, na streho postavilo sončno elektrarno, zamenjalo osebno vozilo z vozilom na električni pogon ipd. Poleg tega načrtovalec ne pozna odjemnih in proizvodnih diagramov v prihodnosti. Vpliv vseh neznank lahko zajamemo z uporabo verjetnostnega izračuna pretokov moči, saj s ponovitvijo večjega števila izračunov zajamemo večje število možnih obratovalnih stanj v omrežju [5].

Stohastična metoda je v literaturi najpogosteje uporabljena metoda za določanje priključne zmogljivosti distribucijskih omrežij. Za ustvarjanje različnih scenarijev, ki so uporabljeni v stohastični metodi, prevladuje metoda Monte Carlo. Stohastična metoda nam omogoča prikazovanje realnih razmer, vendar moramo ob tem upoštevati, da njena rešitev ni nujno optimalna rešitev priključne zmogljivosti distribucijskega omrežja. Sama metoda je sicer nekakšno nasprotje običajnim determinističnim in numeričnim metodam, saj omogoča dovolj natančne rešitve številnih matematičnih problemov. Posebnost metode je torej uporaba tehnike naključnega izbiranja, ki nas pripelje do rešitve [6].

## 2.3 Optimizacijska metoda

V nasprotju s stohastično metodo, katere rezultat ni nujno optimalen, lahko optimalno rešitev vprašanja priključne zmogljivosti distribucijskega omrežja dobimo z optimizacijsko metodo. S to metodo je priključevanje novih razpršenih virov električne energije ali porabniških naprav opredeljeno kot optimizacijski problem. Rešitev tega problema je maksimalno število na novo priključenih razpršenih virov električne energije ali porabniških naprav v distribucijskem omrežju, kjer so upoštevani obratovalni kriteriji distribucijskega omrežja. Optimizacijski problem je lahko definiran z eno ali več kriterijskimi funkcijami [7]. Izbrati je možno tudi eno ali več različnih omejitev problema, kot so vozliščne napetosti ali tokovi vodnikov.

Za reševanje optimizacijskega problema je na voljo več možnosti. Najpogosteje uporabljene metode so optimizacija z rojem delcev, algoritem umetne kolonije čebel, robustna optimizacija ter genetski algoritem.

Med slabostmi optimizacijskih algoritmov lahko omenimo njihovo časovno potratnost, saj potrebujejo več iteracij, da dosežejo optimalno rešitev. Veliko teh algoritmov uporablja izmenični izračun pretokov moči, ki je že sam po sebi iterativna metoda. Nekateri algoritmi

za zmanjšanje časovne potratnosti uporabljajo tehniko izračuna linearnega pretoka moči [8], [9].

## 3 OPIS UPORABLJENIH METOD

V tretjem poglavju sta opisani metodi, ki sta bili uporabljeni za izračun priključne zmogljivosti distribucijskega omrežja. Izbrani sta bili, ker vrmeta optimalno vrednost priključne zmogljivosti v danem trenutku, kar je ključno, če želimo v celoti izkoristiti obstoječo infrastrukturo omrežja [4]. Prva metoda, ki je predstavljena, je optimizacija z rojem delcev. Nato je predstavljena še metoda, ki temelji na teoriji občutljivostnih koeficientov.

### 3.1 Optimizacija z rojem delcev

Metoda optimizacije z rojem delcev je bila prvič predstavljena leta 1995, ko sta avtorja Kennedy in Eherhart predstavila optimizacijski algoritem, ki temelji na družbenem vedenju organizmov, kot je jata rib ali ptic [10]. Algoritem se šteje pod populacijsko stohastično optimizacijsko metodo, kjer kandidati oz. delci letijo v problemskem prostoru in iščejo optimum izbrane kriterijske funkcije. Vsi kandidati s časom prilagajajo svoj položaj glede na lastne izkušnje in izkušnje celotne populacije do opazovanega trenutka. Spremembo hitrosti in položaja vsakega kandidata lahko matematično opišemo z enačbama (1) in (2).

$$v_i^{(t)} = v_i^{(t-1)} + r_1 \cdot c_1 (pb_i - x_i^{(t-1)}) + r_2 \cdot c_2 (gb_i - x_i^{(t-1)}) \quad (1)$$

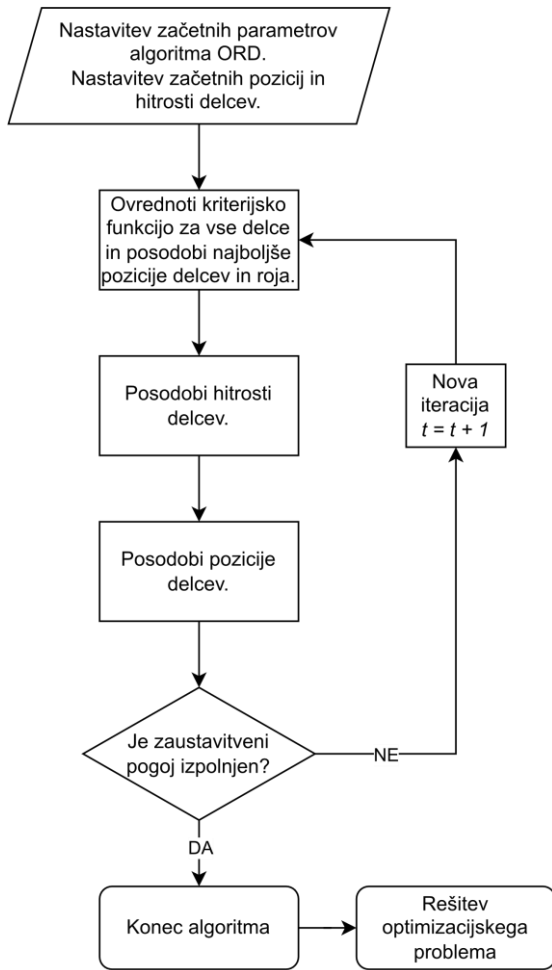
$$x_i^{(t)} = x_i^{(t-1)} + v_i^{(t)} \quad (2)$$

Faktor  $c_1$  predstavlja kognitivni učni faktor, ki uteži stohastično privlačnost k delčevemu najboljšemu položaju do trenutka  $t$ . Faktor  $c_2$  predstavlja družbeni učni faktor, ki uteži stohastično privlačnost k najboljšemu položaju celotnega roja do trenutka  $t$ . Kennedy in Eherhart v [10] predlagata, da sta konstanti  $c_1$  in  $c_2$  enaki. Konstanti naj bi bili nastavljeni na vrednost 2. Koeficienta  $r_1$  in  $r_2$  privzameta naključno vrednost na intervalu (0-1).

Slabost osnovne metode je konvergenca, saj lahko hitrost kandidata narašča čez vse meje. Zato lahko izrazu (1) dodamo inercialno utež  $w$  ter dobimo izraz (3). S tem preprečimo, da bi hitrost kandidata naraščala čez vse meje, ter zagotovimo konvergenco algoritma.

$$v_i^{(t)} = w \cdot v_i^{(t-1)} + r_1 \cdot c_1 (pb_i - x_i^{(t-1)}) + r_2 \cdot c_2 (gb_i - x_i^{(t-1)}) \quad (3)$$

Druga slabost, ki so jo odkrili, je, da se kandidati lahko ustalijo v lokalnem namesto globalnem optimumu [4]. Če želimo odpraviti to slabost ter zagotoviti, da metoda vrne globalni optimum, moramo v osnovno metodo vpeljati mutacijo, ki v tem delu ni bila izvedena, zato ni podrobneje opisana.



Slika 3: Diagram poteka optimizacije z rojem delcev.

Slika 3 prikazuje diagram poteka optimizacije z rojem delcev. V prvem koraku mora uporabnik nastaviti začetne parametre izbrane metode. Začetni parametri so maksimalno število iteracij, število delcev v roju in razpon problemskega prostora, ki je definiran z vektorjem  $x_{min} = (x_{min,1}, x_{min,2}, \dots, x_{min,d})^T$  in vektorjem  $x_{max} = (x_{max,1}, x_{max,2}, \dots, x_{max,d})^T$  dolžine  $d$ , kjer je  $d$  enak dimenziji prostora, ter vektorjem  $v_{max} = (v_{max,1}, v_{max,2}, \dots, v_{max,d})^T$ , s katerim omejimo absolutno hitrost delcev, inercijsko utež  $w$  ter vrednosti učnih faktorjev  $c_1$  in  $c_2$ . Nato vsem delcem nastavimo naključne začetne položaje in začetne hitrosti. Sledi iteracijski postopek, dokler ne izpolnimo enega izmed zaustavitvenih pogojev. Eden izmed pogojev je maksimalno število iteracij. Drugi pogoj izpolnimo, ko rešitev doseže predpisano natančnost. Rezultat takšnega algoritma je delec z najboljšim položajem glede na podano kriterijsko funkcijo.

### 3.2 Teorija občutljivostnih koeficientov

Klasična občutljivostna teorija se je v preteklosti uporabljala predvsem za izračune primarne in sekundarne regulacije v visokonapetostnih omrežjih [4]. Teorija temelji na Jacobijevi matriki, ki prikazuje

povezavo med vozliščnimi napetostmi (amplitudo in faznim kotom) ter injekcijo delovne in jalove moči v vozlišča. Matematično lahko te odnose zapišemo z izrazom (4).

$$\begin{bmatrix} [\Delta V] \\ [\Delta \vartheta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \vartheta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \vartheta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix} \quad (4)$$

$[\Delta V]$  in  $[\Delta \vartheta]$  v izrazu (4) predstavljata spremembo amplitude in faznega kota vozliščne napetosti zaradi spremembe injiciranih delovnih ali jalovih moči  $[\Delta P^*]$  in  $[\Delta Q^*]$ . Poenostavljeno to zapišemo z izrazom (5).

$$\begin{bmatrix} [\Delta V] \\ [\Delta \vartheta] \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix} \quad (5)$$

Matrika  $[S]$  v izrazu (5) predstavlja matriko občutljivostnih koeficientov. Za radialna omrežja velja, da lahko reguliramo vozliščne napetosti samo z amplitudo napetosti, zato v nadaljevanju del s faznim kotom zanemarimo [11].

Z izrazom (6), kjer  $E_0$  predstavlja fazno napetost na zbiralki, kamor je priključena nizkonapetostna stran SN/NN transformatorja (pri tem velja, da je  $E_0 = V_n/\sqrt{3}$ ),  $E_i$  pa predstavlja fazno napetost vozlišča  $i$ , lahko zapišemo katerokoli razliko vozliščnih napetosti v radialnem omrežju.

$$V_{0i} = E_0 - E_i \quad (6)$$

Izraz (6) lahko ob upoštevanju, da je padec napetosti v radialnih omrežjih enak vsoti padcev napetosti med vsemi povezanimi vozlišči med izhodiščem in  $i$ -tim vozliščem, preoblikujemo v izraz (7).

$$V_{0i} = \sum U_{ab} \quad (7)$$

$U_{ab}$  v izrazu (7) predstavlja padec napetosti med sosednjima vozliščema, ki tvorita del povezave med izhodiščem in  $i$ -tim vozliščem. Z drugimi besedami: padec napetosti je funkcija delovnih in jalovih komponent.

$$U_{ab} = R_{ab} \cdot I_{ab} \cdot \cos \varphi_{ab} + X_{ab} \cdot I_{ab} \cdot \sin \varphi_{ab} \quad (8)$$

Z nadaljnjo matematično manipulacijo lahko izraz (8) množimo z  $\frac{U_b}{U_b}$ , kjer  $U_b$  predstavlja napetost vozlišča  $b$ , ter izraz za izračun padca napetosti preoblikujemo v izraz (9).  $P_{ab}$  in  $Q_{ab}$  zdaj predstavljata skupno delovno in jalovo moč vozlišča  $b$  in vseh vozlišč dolvodno glede na vozlišče  $b$ , medtem ko  $R_{ab}$  in  $X_{ab}$  predstavljata upornost in reaktanco vodnika, ki povezuje vozlišči  $a$  in  $b$ .

$$U_{ab} = \frac{R_{ab} \cdot P_{ab} + X_{ab} \cdot Q_{ab}}{U_b} \cong \frac{R_{ab} \cdot P_{ab} + X_{ab} \cdot Q_{ab}}{E_N} \quad (9)$$

V literaturi pogosto predpostavijo, da so vozliščne napetosti v večini primerov blizu nazivne napetosti omrežja, zato lahko izraz (9) poenostavimo tako, da napetost  $U_b$  zamenjamo z nazivno napetostjo omrežja  $E_N$ .

Ob upoštevanju izrazov (7) in (9) lahko trdimo, da je padec napetosti med vozliščem nizkonapetostne strani SN/NN-transformatorja in izbranim vozliščem  $i$  funkcija vseh delovnih in jalovih moči bremen in generatorjev, ki so topološko povezani z vozliščem  $i$ . Zdaj lahko izraz (7) preoblikujemo in zapišemo izraz (10), kjer člena  $\frac{\partial V_i}{\partial P_j}$  in  $\frac{\partial V_i}{\partial Q_j}$  predstavljata spremembo napetosti, ki bo nastala v vozlišču  $i$  zaradi spremembe delovne in jalove moči v vozlišču  $j$ .

$$\Delta V_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial V_i}{\partial P_j} \cdot \Delta P_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial V_i}{\partial Q_j} \cdot \Delta Q_j \quad (10)$$

Celoten sistem občutljivostne matrike lahko matrično opišemo z izrazoma (11) in (12).

$$[S_P] = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial P_1} & \frac{\partial V_1}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial P_n} \\ \frac{\partial V_2}{\partial P_1} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial V_n}{\partial P_1} & \dots & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial P_n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[S_Q] = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_2} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial Q_n} \\ \frac{\partial V_2}{\partial Q_1} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial V_n}{\partial Q_1} & \dots & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial Q_n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

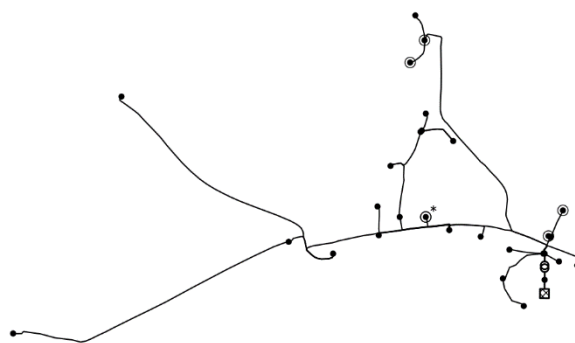
Z izrazoma (13) in (14), kjer  $R_{ij}$  in  $X_{ij}$  predstavljata seštevek upornosti in reaktanc vodnikov ob upoštevanju topologije omrežja,  $Z_{TR}$  pa predstavlja impedanco transformatorja, lahko zapišemo posamezne člene občutljivostne matrike.

$$(S_P)_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial P_j} = - \left( \frac{R_{ij}}{E_N} + \text{Re}(Z_{TR}) \right) \quad (13)$$

$$(S_Q)_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial Q_j} = - \left( \frac{X_{ij}}{E_N} + \text{Im}(Z_{TR}) \right) \quad (14)$$

#### 4 PRIMER UPORABE METOD NA MODELU REALNEGA DISTRIBUCIJSKEGA OMREŽJA

Metodi bosta s simulacijami preizkušeni na realnem radialnem nizkonapetostnem distribucijskem omrežju. Shema omrežja je prikazana na sliki 4. V omrežje je vgrajen transformator, katerega naznačena moč je 100 kVA. V omrežje je priključenih 26 odjemalcev, ki so med seboj povezani z 28 odseki vodov. S črnimi krogi je obkroženih 6 sončnih elektrarn (SE), ki bodo v tem primeru zagotavljale prožnost s premikanjem svoje delovne točke. Poleg enega kroga je dodana tudi zvezdica, ki ponazarja, da sta na isto vozlišče priključeni dve SE, vsaka s svojim števcem. SN del omrežja je modeliran s togo mrežo.



Slika 4: Uporabljeno distribucijsko omrežje.

Simulacijski model omrežja je sestavljen na podlagi baze podatkov dejanskega omrežja, ki nam ga je z izvozom iz sistema GIS (geografski informacijski sistem) posredovalo distribucijsko podjetje Elektro Gorenjska. Te podatke v obliki tabel je mogoče vizualizirati, pregledovati in urejati z odprtokodnim programom QGIS [12]. Podatke iz baze smo najprej izvozili, nato smo jih uredili v ustrezno obliko, da smo omrežje modelirali z izbrano simulacijsko knjižico *pandapower*, ki omogoča izračune pretokov moči v programskem jeziku Python [13].

Poleg tega sta bili v programskem jeziku modelirani tudi obe izbrani metodi. Kot je bilo že omenjeno, je omrežje modelirano s knjižico *pandapower*, ki zajema vse funkcionalnosti na področju simulacijskega okolja, ki so služile za primerjavo metod. Za modeliranje metode optimizacije z rojem delcev je bila izbrana odprtokodna knjižica *pyswarm* [14], medtem ko smo metodo, ki temelji na teoriji občutljivostnih koeficientov, spisali sami v programskem jeziku Python.

##### 4.1 Definicija primera uporabe

Namen obeh metod, predstavljenih v tem prispevku, je izračun priključne zmogljivosti v nizkonapetostnem distribucijskem omrežju na strani proizvodnje v izbranem trenutku. To lahko matematično opišemo z izrazom (15), kjer je  $N$  število sončnih elektrarn v omrežju in  $P_{SE}(j)$  moč  $j$ -te sončne elektrarne, ki je priključena v omrežje.

$$SE_{\max} = \sum_{j=1, \dots, N} P_{SE}(j) \quad (15)$$

Pri optimizacijskem problemu je bilo upoštevanih več omejitev. Prva omejitev je bila, da se morajo napetosti vseh zbiralk v omrežju nahajati na intervalu [1,0–1,05 p.u.]. Upoštevano je bilo, da je amplituda toka, ki teče skozi posamezen element v omrežju, pod termično mejo elementa. Zadnja upoštevana omejitev je bila, da lahko posamezna sončna elektrarna deluje med 0 in 20 kW delovne moči. Vrednosti inercijske uteži, učnih faktorjev, maksimalnega števila iteracij in tolerance rešitve so predstavljene v tabeli 1.

Tabela 1: Uporabljeni parametri metode optimizacije z rojem delcev in metode z občutljivostnimi koeficienti.

	$w$	$c_1$	$c_2$	$t_{\max}$	$\mu$
<b>Vrednost</b>	0,7	2	2	100	1e-6

#### 4.2 Analiza rezultatov metod

Obe metodi sta kot rezultat določili delovne točke posamezne sončne elektrarne. Ker smo želeli izračunati priključno zmogljivost distribucijskega omrežja, je cilj, da je vsota delovnih moči vseh sončnih elektrarn čim večja. Ob tem je treba upoštevati, da omrežje po nastavitvi novih delovnih točk posamezne sončne elektrarne obratuje znotraj prej nastavljenih kriterijev obratovanja. Poleg tega smo uspešnost opredelili tudi s časovno potratnostjo metode.

Najprej smo analizirali stanje za primer, ko so imeli vsi odjemalci delovno točko nastavljeno na 0 kW, medtem ko je bila delovna točka posamezne elektrarne postavljena na 20 kW. To stanje smo poimenovali S1.

V tabelah 2 in 3 so predstavljeni rezultati začetnega stanja. Iz rezultatov v tabeli 3 lahko razberemo, da so v scenariju S1 kršeni obratovalni kriteriji, saj je maksimalna napetost v omrežju dosegla 1,059 p.u., medtem ko je transformator obremenjen nad njegovo termično mejo. To pomeni, da vse sončne elektrarne v omrežju ne morejo delovati v začetni točki (20 kW). Zato je treba izvesti izračun priključne zmogljivosti distribucijskega omrežja, ki bo kot rezultat vrnil maksimalno moč posamezne sončne elektrarne. S tem bo zagotovljeno tudi, da bo omrežje obratovalo znotraj obratovalnih kriterijev. Stanje S2 predstavlja rezultate metode optimizacije z rojem delcev, medtem ko stanje S3 predstavlja rezultate metode z občutljivostnimi koeficienti.

Tabela 2: Posamezne delovne točke sončnih elektrarn in skupna moč sončnih elektrarn.

	$P_{SE,1} /$ kW	$P_{SE,2} /$ kW	$P_{SE,3} /$ kW	$P_{SE,4} /$ kW	$P_{SE,5} /$ kW	$P_{SE,6} /$ kW	$\Sigma P /$ kW
S1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	120,0
S2	20,0	20,0	20,0	20,0	4,1	20,0	104,1
S3	20,0	20,0	20,0	16,9	7,2	20,0	104,1

Tabela 3: Posamezne delovne točke sončnih elektrarn in skupna moč sončnih elektrarn.

	$S_{TR} /$ p.u.	$V_{\min} /$ p.u.	$V_{\max} /$ p.u.	$I_{v,\max} /$ p.u.	$t /$ s
S1	1,14	1,03	1,059	0,32	/
S2	1,03	1,03	1,048	0,32	141
S3	1,00	1,03	1,050	0,32	1

Iz rezultatov v tabeli 3 lahko razberemo, da sta bili obe metodi uspešni, saj je maksimalna napetost v obeh primerih znašala 1,05 p. u., prav tako pa je transformator obremenjen pod termično mejo. To pomeni, da smo na zgornjem robu obeh obratovalnih kriterijev. Z drugimi besedami: z dano konfiguracijo delovnih točk sončnih elektrarn smo popolnoma izkoristili obstoječo infrastrukturo, kar glede na opis v 2. poglavju predstavlja priključno zmogljivost omrežja v danem trenutku. Tako bo predstavljena konfiguracija delovnih točk sončnih elektrarn zagotovila maksimalno proizvodnjo električne energije iz sončnih elektrarn ob upoštevanju postavljenih obratovalnih kriterijev. V tabeli 2 lahko vidimo, da obe metodi kot rezultat vrnete enako vrednost priključne zmogljivosti omrežja (zadnji stolpec). Iz rezultatov je razvidno tudi, da je konfiguracija posameznih delovnih točk sončnih elektrarn različna. To je posledica termične omejitve transformatorja, pri čemer je vseeno, kje v omrežju zmanjšamo delovno moč. Druga velika razlika je časovna potratnost, ki sta ga za ta izračun potrebovali obe metodi. V zadnjem stolpcu tabele 3 lahko vidimo razliko v časih izračuna, ki se razlikujeta za več kot 100-krat.

S temi ugotovitvami lahko sklenemo, da sta obe metodi podobno natančni, vendar bi bila zaradi časovne potratnosti metoda, ki temelji na občutljivostnih koeficientih, primernejša za uporabo v aplikacijah, ki delujejo v skoraj realnem času, med katere v elektroenergetiki spada obratovanje distribucijskega omrežja.

## 5 ZAKLJUČEK

Sodobna nizkonapetostna distribucijska omrežja so pred velikim izzivom, ko gre za vpeljave novih tipov bremen, kot so električna vozila ali toplotne črpalke, ter večanje deleža razpršenih virov, kot so sončne elektrarne. Če želimo zagotoviti, da bodo distribucijska omrežja tudi po priklopu novih naprav obratovala znotraj obratovalnih kriterijev, je smiselna vpeljava koncepta priključne zmogljivosti posameznega omrežja v sklopu obratovanja distribucijskega omrežja.

V prispevku sta bili obravnavani dve metodi, ki bi v prihodnosti lahko služili kot osnovi za vpeljavo algoritma vodenja prožnosti odjema in proizvodnje. To sta metoda optimizacije z rojem delcev in metoda, temelječa na občutljivostni teoriji, ki jo poznamo predvsem v prenosnih omrežjih. Simulacijski rezultati so pokazali, da sta obe metodi vrnila delovne točke sončnih elektrarn tako, da je obstoječa infrastruktura omrežja popolnoma

izkoriščena. Skupna moč delovnih točk sončnih elektrarn obeh metod je bila zelo primerljiva, vendar je metoda, ki temelji na občutljivostnih koeficientih, izračun priključne zmogljivosti omrežja opravila v veliko krajšem času. To je zelo pomembna lastnost, če bi koncept priključne zmogljivosti želeli implementirati v sklopu obratovanja distribucijskih omrežij.

### ZAHVALA

Priprava članka je nastala v okviru raziskovalnega programa št. L2-3162 – Razvoj platform za lokalni trg prožnosti na področju distribucijskih omrežij (DN-FLEX), ki ga je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

### LITERATURA

- [1] "Standard SIST EN 50160:2011: Značilnosti napetosti v javnih razdelilnih omrežjih, 1- mar-2011."
- [2] "Sistemska obratovalna navodila za distribucijsko omrežje električne energije," *pisrs*. <http://pisrs.si> (accessed Nov. 23, 2022).
- [3] "Introduction," in *Integration of Distributed Generation in the Power System*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 1–5. doi: 10.1002/9781118029039.ch1.
- [4] K. Knez, "Zasnova algoritma za vodenje prožnosti odjema in proizvodnje v distribucijskih omrežjih," thesis, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2023. Accessed: Jun. 28, 2023. [Online]. Available: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=147015>
- [5] Blažič, Boštjan, Herman, Leopold, Ilkovski, Marjan, and Knez, Klemen, "D3.1: Metodologija in orodje za načrtovanje pametnih omrežij," Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, 2023.
- [6] M. Kolenc, "KOORDINIRANA REGULACIJA NAPETOSTI V DISTRIBUCIJSKIH OMREŽJIH Z RAZPRŠENO PROIZVODNJO OB RAZLIČNIH KRITERIJIH REGULACIJE JALOVE MOČI," Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2015. Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=30816>
- [7] M. Alturki, A. Khodaei, A. Paaso, and S. Bahramirad, "Optimization-based distribution grid hosting capacity calculations," *Applied Energy*, vol. 219, pp. 350–360, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.127.
- [8] M. Alturki and A. Khodaei, "Marginal Hosting Capacity Calculation for Electric Vehicle Integration in Active Distribution Networks," in *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Denver, CO: IEEE, Apr. 2018, pp. 1–9. doi: 10.1109/TDC.2018.8440134.
- [9] S. Lakshmi and S. Ganguly, "Simultaneous optimisation of photovoltaic hosting capacity and energy loss of radial distribution networks with open unified power quality conditioner allocation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 12, pp. 1382–1389, Sep. 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5389.
- [10] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Nov. 1995, pp. 1942–1948 vol.4. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [11] M. Brenna, E. D. Berardinis, F. Foiadelli, G. Sapienza, and D. Zaninelli, "Voltage Control in Smart Grids: An Approach Based on Sensitivity Theory," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 2010, Sep. 2010, doi: 10.4236/jemaa.2010.28062.
- [12] "QGIS Training Manual — QGIS Documentation documentation." [https://docs.qgis.org/3.28/en/docs/training\\_manual/index.html](https://docs.qgis.org/3.28/en/docs/training_manual/index.html) (accessed Apr. 27, 2023).
- [13] "pandapower — pandapower 2.12.1 documentation." <https://pandapower.readthedocs.io/en/latest/> (accessed Apr. 27, 2023).
- [14] "Particle swarm optimization (PSO) with constraint support — pyswarm 0.6 documentation." <https://pythonhosted.org/pyswarm/> (accessed Apr. 27, 2023).

**Klemen Knez** je leta 2020 diplomiral in leta 2023 magistriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od januarja 2020 na tej fakulteti dela kot študent dela v Laboratoriju za električna omrežja in naprave, in sicer na področju pametnih omrežij.

**Leopold Herman** je leta 2008 diplomiral in leta doktoriral 2014 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je na tej fakulteti zaposlen kot raziskovalec v Laboratoriju za električna omrežja in naprave. Poleg poučevanja njegovo raziskovalno delo obsega področje kakovosti električne energije.

**Boštjan Blažič** je leta 2000 diplomiral, leta 2003 magistriral in leta 2005 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je bil od leta 2007 zaposlen kot asistent, od leta 2019 pa kot profesor. Poleg poučevanja njegovo delo zajema še raziskave na področju pametnih omrežij in sodobnih kompenzacijskih naprav.