

**ANALIZA UTICAJA PROMENE PROIZVODNJE DISTRIBUTIVNIH GENERATORA NA REŽIM RADA DISTRIBUTIVNE MREŽE****ANALYSIS OF THE IMPACT OF CHANGES IN THE PRODUCTION OF DISTRIBUTION GENERATORS ON THE MODE OF OPERATION OF THE DISTRIBUTION NETWORK**

Predrag Vasiljević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U ovom radu je razmatran uticaj promene proizvodnje distributivnih generatora (DG) na režim rada distributivne mreže (DM). U radu je prikazan uticaj DG na struju na sekundaru i tercijaru regulacionog transformatora, napon na krajevima izvoda i gubitke snage u DM.

**Ključne reči:** Distributivna mreža, Distributivni generator

**Abstract** – This paper discusses the impact of the change in production of distribution generators (DG) on the mode of operation of the distribution network (DM). This paper shows influence of DG on transformers secondary and tertiary current, voltage at the end of the distribution lines and power losses.

**Keywords:** Distribution network, Distributed generation

**1. UVOD**

Sve veći uticaj, tzv. penetracija, obnovljivih energetskih izvora (RES – renewable energy sources) i električnih vozila (EV – electric vehicles) značajno utiče na tradicionalne distributivne mreže (DM). Do juče potpuno pasivne DM, sa nedvosmisleno definisanim tokovima aktivne snage, od korena DM do potrošača, postaju sve aktivnije DM, sa dvosmernim protokom aktivne snage [1,2,3].

Posledica ovakvih promena jeste uvođenje novih problema, kao što su zagušenje mreže i pad napona, kao posledica stohastičkog punjenja EV [4]; obrnuti tok snage i/ili visoki naponi zbog proizvodnje RES [5]; asimetričnih napona usled neuravnoteženog povezivanja jednofaznih EV i RES uređaja [6], i suprotstavljenih interesa proizvođača, distributera i korisnika električne energije, itd. Dakle, jasno je da tradicionalni Volt Var resursi (transformatori sa promenom napona pod opterećenjem, regulatori napona, otočne kondenzatorske baterije) i davno uspostavljeni koncepti regulacije napona (automatski regulator napona sa karakteristikom zakona regulacije, lokalna automatizacija) ne mogu da se izbore sa problemima koje donose aktivne DM. Cilj ovog rada je da se kroz analizu vrednosti dobijenih proračunima tokova snaga, kvantifikuje uticaj DG na režim DM.

**NAPOMENA:**

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

**2. OSNOVNI POJMOVI**

U ovom delu prikazana je metodologija za proračun tokova snaga u DM i regulacioni transformatori, koji se koriste za izradu ovog rada.

**2.1 Metodologija za proračun tokova snaga**

Distributivne mreže, za razliku od prenosnih mreža, karakteriše relativno slaba potencijalna upetljanost i radijalni pogon. Standardne metode za proračun tokova snaga u prenosnim mrežama imaju značajno manju efikasnost kada se primenjuju u distributivnim mrežama. Da bi se ovi problem prevazišli, kao i da bi se ovi proračuni maksimalno ubrzali, razvijeni su specijalizovani algoritmi za proračun tokova snaga u distributivnim mrežama.

**2.2 Algoritam sumiranja struja**

Algoritam počinje inicijalizacijom postupka, a nakon toga sledi iterativni postupak, koji se sastoji od tri koraka:

1. Proračun injektiranih struja:

$$i_i^{(h)} = \left( \frac{s_{p,i}}{V_i^{(h-1)}} \right)^* + y_{0,i} \cdot V_i^{(h-1)}, i = 1, \dots, n_{cv} \quad (1)$$

2. Proračun struja po granama:

$$j_i^{(h)} = i_i^{(h)} + \sum_{j \in i} j_j^{(h)}, i = n_{gr}, \dots, 1, \quad (2)$$

3. Proračuna napona u čvorovima:

$$V_i^h = V_{i-1}^{(h)} - z_i \cdot j_i^{(h)}, i = 1, \dots, n_{cv} \quad (3)$$

**2.3 Regulacioni transformatori**

Energetski transformatori su statički uređaji koji na principu elektromagnetne indukcije pretvaraju napon ili struju između dva ili više namotaja, pri istoj učestanosti, na druge vrednosti napona i struja.

Primenom transformatora omogućeno je da se energija koristi na naponu koji je najekonomičniji, kao i da se proizvodi na naponu koji je najpogodniji. Ako je moduo ili fazni pomeraj fazora napona promenljiv, takvi transformatori su regulacioni transformatori. Oni mogu da se podele na:

- regulacione transformatore sa regulacijom pod opterećenjem (RTrPO) i
- regulacione transformatore s regulacijom u beznaponskom stanju (RTrBS).

### 3. POSTAVKA PROBLEMA

Cilj ovog rada je da se kroz analizu vrednosti dobijenih proračunima tokova snaga, kvantifikuje uticaj DG na režim DM. Pritom, analiziraju se različiti režimi DM, sa različitim vrednostima potrošnje potrošača i različitim vrednostima proizvodnje DG.

Naravno od ključnog interesa za korektan rad celokupnog sistem jeste kvalitetna procena režima DM [7,8].

#### 3.1 Uticaj DG na DM

Primena DG u distributivnom sistemu ima brojne pogodnosti. Sa ekonomskog stanovišta to su: pokrivanje potrošnje potrošača, mogućnost proširenja DG u malim koracima i upravljanje potrošnjom. Sa stanovišta eksploatacije sistema: pozitivan uticaj na naponske prilike, smanjenje gubitaka energije, poboljšanje pouzdanosti. Pored pozitivnih efekata, priključenje DG u DM ima i negativne efekte. Priključenjem DG, u DM koje su projektovane kao pasivne mreže (tokovi aktivne snage su uvek od mreže višeg ka mreži nižeg napona), moguće je da tokovi aktivnih snaga imaju oba smera. To dovodi do problema vezano za regulaciju, upravljanje i zaštitu DM. Problemi rastu sa porastom snage koja se vraća i izraženi su u DM sa malim kapacitetima prenosnih puteva.

#### 3.2 Gubici u DM

Vrednost gubitaka električne energije jedan je od direktnih pokazatelja efikasnosti realizacije osnovne funkcije DM – prenosa energije od prenosne mreže do krajnjih potrošača. Ukupni gubici električne energije u DM predstavljaju razliku između preuzete i isporučene (prodate) električne energije.

Gubici se prema načinu nastanka dele na:

- tehničke (normirane) gubitke,
- komercijalne gubitke.

### 4. VERIFIKACIJA PROBLEMA UTICAJA DG NA REŽIM RADA DM

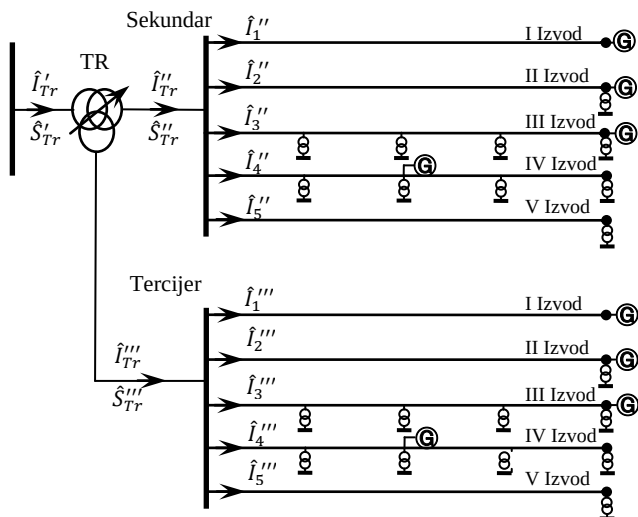
U nastavku rada je izvršena prezentacija uticaja promene proizvodnje DG na režim rada test mreže, odnosno na promene vrednosti sledećih veličina:

- promene napona na sekundaru i tercijeru regulacionog transformatora, kao i na krajevima izvoda,
- promene struja na sekundaru i tercijeru regulacionog transformatora i na početku izvoda,
- promene gubitaka aktivne i reaktivne snage u razmatranoj mreži.

#### 4.1 Test distributivna mreža

Test distributivna mreža prikazana je na slici 1. Mreža se sastoji od jednog trofaznog tronamotajnog regulacionog transformatora (RTr), sa pet različitih izvoda na sekundaru i pet različitih izvoda na tercijeru. Svi izvodi na sekundaru su jednakih dužina, 10 km, dok su svi izvodi na tercijeru dužine 2 km: I izvod – nema potrošače, na njegovom kraju je priključen DG<sub>1</sub> snage  $S_G$ ; II izvod – na kraju voda su priključeni potrošači ukupne snage  $S_p$  i DG<sub>2</sub> snage  $S_G$ ; III izvod – ima 4 jednakih ravnomerno

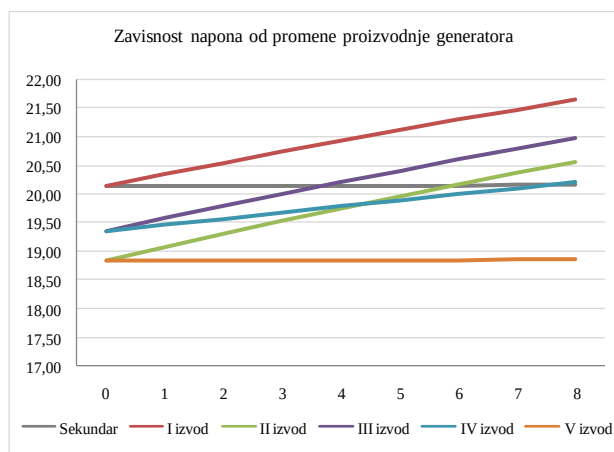
raspoređenih potrošača ukupne snage  $S_p$  i DG<sub>3</sub> na kraju voda snage  $S_G$ ; IV izvod – ima 4 jednakih ravnomerno raspoređenih potrošača ukupne snage  $S_p$  i DG<sub>4</sub> snage  $S_G$  na sredini voda; V izvod – na kraju voda je priključen jedan potrošač ukupne snage  $S_p$ . Ukupna snaga svih potrošača na izvodima (II, III, IV i V) je međusobno jednaka  $S_p$  i u zavisnosti od trenutka ona iznosi:  $S_p=(4+j2)$  MVA,  $S_p=(4-j2)$  MVA ili  $S_p=(4+j0)$  MVA. Snaga distributivnih generatora  $S_G$  menja se od 0 do 8 MW.



Slika 1 – Test distributivna mreža

#### 4.2 Uticaj DG na vrednosti napona u DM

Na slici 2 prikazana je promena napona na sekundaru RTr, i krajevima njegovih izvoda. Ukupna snaga potrošnje, na svakom izvodu sa potrošnjom, II, III, IV i V izvodi, je ista, u prikazanom primeru njena vrednost je  $(4+j2)$  MVA. Pozicija teretnog menjača je  $T=0$ , za sve primere. Analiza je rađena za tri različite snage opterećenja potrošača u mreži:  $S_p=(4+j2)$  MVA,  $(4-j2)$  MVA i  $(4+j0)$  MVA.



Slika 2 – Napon na sekundaru RTr i na krajevima izvoda, u zavisnosti od snage generatora,  $S_p=(4+j2)$  MVA

Sa slike se može uočiti sledeće:

I izvod – vrednost napona raste, od početka ka kraju izvoda. Napon na kraju izvoda raste sa povećanjem proizvodnje generatora. Povećanjem proizvodnje, povećava se i vrednost modula struje. Smer aktivne snage je od kraja izvoda ka njegovom početku. II izvod – na kraju izvoda

postoji potrošač, tako da je porast vrednost napona manja u odnosu na porast vrednost na I izvodu. III izvod – napon raste sa povećanjem proizvodnje, s obzirom da su potrošači raspoređeni duž izvoda vrednos napona je veća u odnosu na drugi izvod. IV izvod – vrednost napona je od 19,37 kV za  $S_G = 0$  MW, ista kao i za III izvod. Za  $S_G = 8$  MW, napon na kraju izvoda je manji u odnosu na napon na III izvodu, zbog pozicije generatora na sredini voda, i rasporedjenih potrošača duž celog izvoda. V izvod – vrednost napona je konstantna.

Dobijeni rezultati vrednosti napona na krajevima izvoda sekundara [kV] prikazani su u tabeli 1, dok su rezultati za vrednost napona [kV] na krajevima izvoda tercijera prikazani u tabeli 2, rezultati su dati za  $S_G = 0, 4$  i 8 MW.

Tabela 1 – Zavisnost napona [kV] na krajevima izvoda sekundara od snage generatora  $S_G$  [MVA]

| $S_p$ [MVA] | Izvod | $S_G=0$ | $S_G=4$ | $S_G=8$ |
|-------------|-------|---------|---------|---------|
| (4+j0)      | I     | 20,01   | 20,80   | 21,53   |
|             | II    | 19,11   | 20,01   | 20,81   |
|             | III   | 19,47   | 20,31   | 21,08   |
|             | IV    | 19,47   | 19,90   | 20,32   |
|             | V     | 19,11   | 19,11   | 19,13   |
| (4+j2)      | I     | 20,16   | 20,94   | 21,67   |
|             | II    | 18,85   | 19,76   | 20,57   |
|             | III   | 19,37   | 20,22   | 20,99   |
|             | IV    | 19,37   | 19,80   | 20,23   |
|             | V     | 18,85   | 18,85   | 18,86   |
| (4-j2)      | I     | 19,86   | 20,66   | 21,39   |
|             | II    | 19,36   | 20,24   | 21,04   |
|             | III   | 19,57   | 20,41   | 21,17   |
|             | IV    | 19,57   | 20,00   | 20,42   |
|             | V     | 19,36   | 19,36   | 19,37   |

Tabela 2 – Zavisnost napona [kV] na krajevima izvoda tercijera od snage generatora

| $S_p$ [MVA] | Izvod | $S_G=0$ | $S_G=4$ | $S_G=8$ |
|-------------|-------|---------|---------|---------|
| (4+j0)      | I     | 10,07   | 10,32   | 10,56   |
|             | II    | 9,72    | 10,00   | 10,26   |
|             | III   | 9,86    | 10,13   | 10,37   |
|             | IV    | 9,86    | 9,96    | 10,06   |
|             | V     | 9,72    | 9,65    | 9,59    |
| (4+j2)      | I     | 10,10   | 10,36   | 10,59   |
|             | II    | 9,59    | 9,88    | 10,14   |
|             | III   | 9,79    | 10,06   | 10,31   |
|             | IV    | 9,79    | 9,90    | 10,00   |
|             | V     | 9,59    | 9,52    | 9,45    |
| (4-j2)      | I     | 10,04   | 10,29   | 10,53   |
|             | II    | 9,84    | 10,12   | 10,38   |
|             | III   | 9,92    | 10,19   | 10,44   |
|             | IV    | 9,92    | 10,02   | 10,13   |
|             | V     | 9,84    | 9,77    | 9,71    |

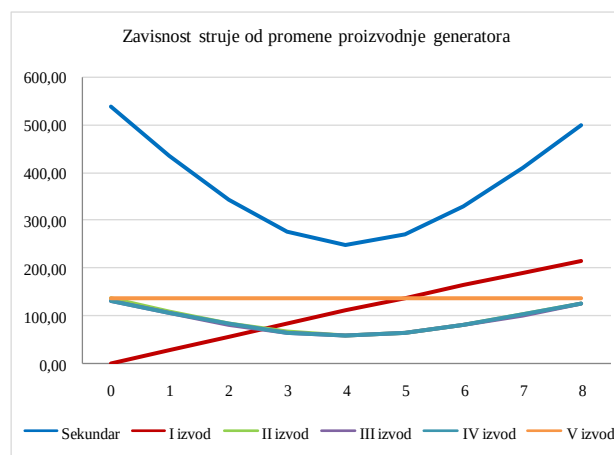
#### 4.3 Uticaj promene proizvodnje DG na vrednosti struja u DM

U ovom poglavlju prikazana je zavisnost vrednosti modula struje od promene snage generatora.

Na slici 3 prikazane su struje na sekundaru RTr i na početku njegovih izvoda u zavisnosti od promene snage generatora. U ovom primeru ukupna snaga svih potrošača

na izvodima je (4+j2) MVA. Snaga generatora se menja od 0 MW do 8 MW.

Na sekundaru RTr za  $S_G=0$  MW, nema proizvodnje, svi potrošači se napajaju u celosti preko transformatora. Odnosno snaga izmerena na sekundaru RTr jednaka je ukupnoj snazi svih potrošača razmatrane DM (plus gubici u DM). Sa povećanjem snage generatora, iako snaga potrošača ostaje ista, struja na sekundaru transformatora se smanjuje, jer se sada deo potrošača napaja iz DM. Vrednost modula struje se smanjuje do  $S_G=4$  MW, kada se vrednosti proizvodnje i potrošnje aktivne snage izjednače. Ako proizvodnja nastavi da raste, pojaviće se višak aktivne snage u DM, taj višak će se preko RTr posalti u prenosnu mrežu. Samim tim se struja na sekundaru transformatora povećava. Na I izvodu sa povećanjem snage generatora, povećava se i struja. Promene struje na II, III i IV izvodu se poklapaju, na ovim izvodima se dešava slična situacija kao na sekundaru RTr s tim da su vrednosti struje manje. Na V izvodu struja je konstantna jer je priključen samo potrošač.



Slika 3 – Struje na sekundaru RTr i na početku njegovih izvoda u zavisnosti od snage generatora,  $S_p = (4+j2)$  MVA

Vrednosti struja na početku izvoda sekundara RTr za tri različite vrednosti snage potrošača:  $S_p = (4+j2)$  MVA, (4-j2) MVA i (4+j0) MVA prikazani su u tabeli 3, rezultati su dati za  $S_G = 0, 4$  i 8 MW.

Tabela 3 – Vrednosti struje [A] na početku izvoda sekundara pri promeni snage generatora  $S_G$  [MVA]

| $S_p$ [MVA] | Izvod | $S_G=0$ | $S_G=4$ | $S_G=8$ |
|-------------|-------|---------|---------|---------|
| (4+j0)      | I     | 0,47    | 111,19  | 214,70  |
|             | II    | 120,74  | 0,47    | 111,10  |
|             | III   | 117,34  | 1,58    | 107,66  |
|             | IV    | 117,34  | 0,95    | 112,58  |
|             | V     | 120,74  | 120,76  | 120,68  |
| (4+j2)      | I     | 0,48    | 110,43  | 213,33  |
|             | II    | 137,09  | 58,89   | 125,85  |
|             | III   | 131,77  | 59,31   | 124,88  |
|             | IV    | 131,77  | 58,76   | 126,94  |
|             | V     | 137,09  | 137,10  | 137,01  |
| (4-j2)      | I     | 0,47    | 111,94  | 216,08  |
|             | II    | 133,12  | 56,58   | 122,61  |
|             | III   | 130,82  | 56,15   | 118,46  |
|             | IV    | 130,82  | 56,66   | 125,06  |
|             | V     | 133,12  | 133,13  | 133,04  |

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti sledeće:

Moduo struje na sekundaru RTr je najveći kada potrošnja ima vrednost  $S_p=(4+j2)$  MVA, a najmanju kada potrošnja ima vrednost  $S_p=(4+j0)$  MVA. Struja na I izvodu linearno raste sa povećanjem proizvodnje DG i ima približno jednake vrednosti za sve tri vrednosti potrošnje. Najveće vrednosti struje na II, III i IV izvodu su u trenutku kada nema proizvodnje, odnosno kada je  $S_G=0$  MW. Pri povećanju proizvodnje DG smanjuje se vrednost struje na ovim izvodima (za sve tri vrednosti potrošnje) sve do trenutka kada je  $S_G=4$  MW, minimalna vrednost struje u tom trenutku dobije se za vrednost potrošnje  $S_p=(4+j0)$  MVA. Pri daljem povećanju proizvodnje vrednost struje na ovim izvodima raste (za sve tri vrednosti potrošnje), maksimalna vrednost se dobija za  $S_p=(4+j2)$  MVA i  $S_G=8$  MW. Struja na V izvodu ima konstantnu vrednost za sve tri vrednosti potrošnje.

#### 4.4 Uticaj promene proizvodnje DG na vrednosti gubitaka snage u DM

Gubitaka aktivne i reaktivne snage DM, u zavisnosti od vrednosti potrošnje na izvodima i snage proizvodnje DG, prikazani su u tabeli 4 i tabeli 5, respektivno.

Tabela 4 – Zavisnost gubitaka aktivne snage [kVA] distributivne mreže od snage generatora  $S_G$  [MVA]

| $S_G$ [MW] | (4+j0) MVA | (4+j2) MVA | (4-j2) MVA |
|------------|------------|------------|------------|
| 0          | 830,97     | 1063,72    | 1017,14    |
| 1          | 614,95     | 840,72     | 803,81     |
| 2          | 525,78     | 746,18     | 716,08     |
| 3          | 556,95     | 773,40     | 747,59     |
| 4          | 702,60     | 916,36     | 892,59     |
| 5          | 957,38     | 1169,58    | 1145,85    |
| 6          | 1316,44    | 1528,10    | 1502,59    |
| 7          | 1775,32    | 1987,35    | 1958,44    |
| 8          | 2329,94    | 2543,17    | 2509,36    |

Tabela 5 – Zavisnost gubitaka reaktivne snage [kVar] distributivne mreže od snage generatora  $S_G$  [MVA]

| $S_G$ [MW] | (4+j0) MVA | (4+j2) MVA | (4-j2) MVA |
|------------|------------|------------|------------|
| 0          | 513,45     | 657,23     | 628,37     |
| 1          | 426,45     | 565,50     | 544,36     |
| 2          | 423,27     | 558,33     | 543,64     |
| 3          | 499,73     | 631,45     | 622,11     |
| 4          | 652,06     | 780,99     | 776,07     |
| 5          | 876,83     | 1003,45    | 1002,15    |
| 6          | 1170,93    | 1295,66    | 1297,26    |
| 7          | 1531,48    | 1654,68    | 1658,57    |
| 8          | 1955,86    | 2077,85    | 2083,50    |

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti:

- za sve tri vrednosti potrošnje gubici aktivne snage su najveći kada je snaga generatora 8 MW (najveća vrednost se dobija za  $S_p=(4+j2)$  MVA);
- gubici reaktivne snage imaju minimalnu vrednost za potrošnju  $S_p=(4+j0)$  MVA, a maksimalnu vrednost za  $S_p=(4-j2)$  MVA;
- gubici reaktivne snage u DM su najveći kada je snaga generatora 8 MW za sve tri vrednosti potrošnje  $S_p$ .

## 5. ZAKLJUČAK

Ciljevi savremenih trendova u elektroenergetici teže povećanju energetske efikasnosti i racionalnijem korišćenju postojećih resursa, redukciji emisije štetnih gasova, pokrivanje porasta potrošnje električne energije, smanjenje gubitaka u prenosu električne energije od generatora do potrošača, korišćenju obnovljivih izvora energije, sve navedeno vodi ka povećanom interesovanju za ugradnjom sve većeg broja distributivnih generatora. Priključenje distributivnih generatora na sistem drastično menja prirodu postojeće radialno napajane distributivne mreže od pasivne u aktivnu. Distributivni generatori mogu imati pozitivan uticaj na naponske prilike i kvalitet el. energije. Kada se u mreži više električne energije troši nego što se proizvodi tada svako povećanje proizvodnje distributivnih generatora utiče na smanjenje gubitaka u mreži. Međutim, kada je proizvodnja veća od potrošnje tada se dodatnim povećanjem proizvodnje distributivnih generatora gubici povećavaju. Prilikom planiranja implementacije distributivnih generatora u mrežu neophodno je napraviti detaljnu analizu i izabrati najpovoljniju poziciju i snagu distributivnih generatora kako bi se ostvarili benefiti u korist distributivnog sistema.

## 6. LITERATURA

- [1] G.Švenda: Specijalizovani softveri u elektroenergetici, skripta sa predavanja iz istoimenog predmeta na master studijama, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2019.
- [2] G.Švenda, Z.Simendić: Adaptive On-Load Tap-Changing Voltage Control for Active Distribution Networks; *Electrical Engineering*, vol. 104, pp. 1041-1056, August 2021. DOI: [10.1007/s00202-021-01357-8](https://doi.org/10.1007/s00202-021-01357-8)
- [3] G.S.Švenda, Z.Simendic, V.Strezoski: Advanced Voltage Control Integrated in DMS, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 43, Issue 1, December 2012, pp. 333-343; DOI: [10.1016/j.ijepes.2012.05.014](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.014)
- [4] J.Quiros-Tortos, L.F.Ochoa, S.W.Alnaser, et al.: Control of EV charging points for thermal and voltage management of LV networks, *IEEE Trans. on PS*, vol. 31, pp. 3028-3039, July 2016.
- [5] S.Hashemi, J.Østergaard: Methods and strategies for overvoltage prevention in low voltage distribution systems with PV, *IET Renew. PowerGener.*, vol. 11, pp. 205-214, November 2016.
- [6] A.Ul-Haq, C.Cecati, K.Strunz, et al: Impact of Electric Vehicle Charging on Voltage Unbalance in an Urban Distribution Network; *Intell. Ind. Syst.*, vol 1, pp. 51-60, May 2015.
- [7] G.Švenda, V.Strezoski, S.Kanju: Real-life distribution state estimation integrated in the distribution management system, *Int. Trans. Electrical Energy Systems*, Vol. 27, Issue 5, e2296, May 2017, pp. 1-16; DOI: [10.1002/etep.2296](https://doi.org/10.1002/etep.2296)
- [8] G.Švenda, S.Kanju: Automatically Generated Three-Phase State Estimation for Unbalanced Distribution Power Grids; *IEEE PESGM 2021*, No. 21PESGM2111, July 26-29 2021, USA; DOI: [10.1109/PESGM46819.2021.9638188](https://doi.org/10.1109/PESGM46819.2021.9638188)

### Kratka biografija



Predrag Vasiljević rođen je u Ljuboviji 1990. godine. Diplomski rad na Elektrotehničkom fakultetu u Istočnom Sarajevu odbranio je 2014. godine u oblasti Elektrotehnika, smer Elektroenergetika. 2020. godine upisuje master studije na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, smer Elektroenergetski sistemi.