

Vpliv dodatnih fotonapetostnih sistemov na prihranke energije v srednjenapetostnem distribucijskem omrežju

Nevena Srečković, Niko Lukač, Gorazd Štumberger

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, Smetanova ul. 17, 2000 Maribor, Slovenija
E-pošta: nevena.sreckovic@um.si

Povzetek. S čedalje večjim prodiranjem razpršenih virov v distribucijsko omrežje je treba ovrednotiti, kako ti vplivajo na obratovalne razmere. Prispevek analizira vpliv generacije delovne in jalove moči dodatnih fotonapetostnih (PV) sistemov, priključenih v del srednjenapetostnega omrežja na levem bregu reke Drave v Mariboru. Na podlagi ocene sončnega in PV-potenciala streh v središču Maribora so bile izbrane najprimernejše strehe za postavitev PV-sistema. Nato je bil ovrednoten njihov vpliv na letne prihranke energije. Rezultati prikazujejo prihranke, dosežene na račun zmanjšanja prenosnih izgub zaradi priključitve dodatnih proizvodnih enot. Ovrednoten je tudi prihranek energije, ki ga je mogoče doseči z ustrezno generacijo jalove moči.

Ključne besede: distribucijsko omrežje, PV-sistemi, PV-potencial, prihranki električne energije

The impact of installing additional PV units on energy saving in a medium-voltage power distribution network

With the higher penetration of the distributed power generation units in the power distribution network it is important to evaluate their impact on the power network operating conditions. The paper analyzes the impact of the active- and reactive-power generation of additional photovoltaic (PV) units to be installed in a part of the medium-voltage network in Maribor. Based on the assessment of the building roofs' solar and PV potential, the impact of installing the PV units on the most suitable roofs on the yearly energy saving is assessed. The amount of the energy saved, due to the power-loss reduction, to be assured by installing additional PV units is determined. The energy saved by optimizing the reactive-power generation is evaluated as well.

Keywords: distribution network, PV-systems, PV-potential, energy saving

1 UVOD

Področje energetike je ključni dejavnik pri težnji k zagotavljanju trajnostnega razvoja. Eden izmed številnih kazalnikov, uporabljenih za ovrednotenje le-tega, je delež proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov energije (OVE) [1]. Posledično se s čedalje večjim številom priključenih razpršenih virov (RV), distribucijska omrežja (DO) spreminjajo iz pasivnih v aktivne elemente elektroenergetskega sistema. Zato je treba ovrednotiti vse vplive, ki jih prinašajo na novo priključeni elementi, in z ustreznimi nadgradnjami sistemov vodenja zagotoviti, da se koristi, ki jih ti omogočajo, maksimalno izrabijo.

Od vseh trenutno razpoložljivih RV fotonapetostni (PV) sistemi kljub zmanjšanju subvencij še vedno zbuja veliko pozornost. Pretvorniki PV-sistemov čez dan obratujejo z maksimalno močjo le v kratkih časovnih intervalih in je zato preostalo razpoložljivo moč mogoče uporabiti za regulacijo napetosti z ustrezno

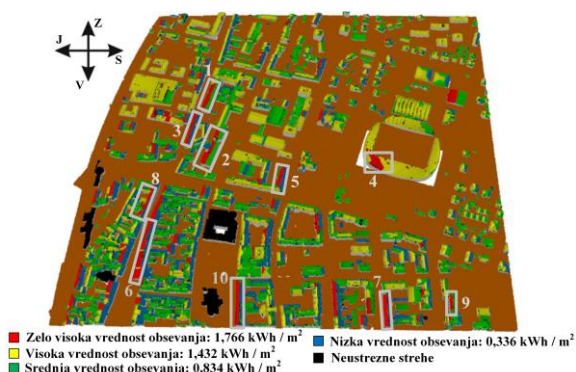
generacijo jalove moči [2], [3]. Tako lahko tudi zmanjšamo prenosne izgube in hkrati zmanjšamo obratovalne stroške [4]. Primer, kako lahko z ustrezno kombinacijo geografskih, ekonomskih in tehničnih vidikov ustrezno umestimo PV-sisteme v DO, je prikazan v [5].

V prispevku je predstavljena analiza vključevanja dodatnih PV-sistemov, v del srednjenapetostnega (SN) omrežja na levem bregu reke Drave v Mariboru. Podoben primer je bil obravnavan v [6], s to razliko, da sta bila v [6] ovrednotena vpliva generacije delovne in jalove moči na prenosne izgube ter na napetostne razmere, upoštevane so bile maksimalna proizvodnja dodatnih PV-sistemov in različne stopnje obremenitve, upoštevano pa je bilo tudi drugačno število izbranih lokacij za postavitev PV-sistemov. V tem prispevku pa so na podlagi časovnih profilov porabe in proizvodnje ovrednoteni celoletni prihranki energije, ki jih je mogoče doseči z generacijo delovne in potrebam omrežja prilagojeno generacijo jalove moči dodatnih sončnih elektrarn, postavljenih na najprimernejše lokacije, gledano s stališča sončnega in PV-potenciala. Prispevek je sestavljen iz šestih poglavij. V drugem poglavju je prikazano ovrednotenje sončnega in PV-potenciala in je na podlagi teh podatkov izbranih deset lokacij, najprimernejših za postavitev PV-sistema. V tretjem poglavju je opisan obravnavani del SN DO Elektro Maribor na levem bregu reke Drave, v četrtem pa je predstavljen postopek izračuna in pridobitve vhodnih podatkov porabe in proizvodnje. V petem poglavju je podan opis dobljenih rezultatov ovrednotenja prihrankov energije z upoštevanjem generacije delovne in različnih stopenj generacije jalove moči. V šestem poglavju je podan sklep.

2 OVREDNOTENJE FOTONAPETOSTNEGA POTENCIALA

Lukač in soavtorji [7] so prikazali uspešno metodo za ovrednotenje streh glede ustreznosti za postavitev PV-sistemov. Na podlagi natančnih topografskih podatkov LiDAR (ang. Light Detection And Ranging) in podatkov sončnega obsevanja, izmerjenih s piranometrom, je bila ocenjena vrednost sončnega potenciala (povprečno obsevanje) in PV-potenciala (električna energija, ki jo je s postavitvijo PV-sistema na obravnavano površino mogoče generirati). Pri izračunu so upoštevani tudi vplivi lokacije, orientacije in naklona streh, oblačnosti, okoliškega terena ter senčenja zaradi sosednjih objektov in vegetacije.

Rezultati povprečnega sončnega obsevanja, določenega za strehe v središču Maribora, so prikazani na sliki 1. Z različnimi barvami so označene kategorije streh glede na ustreznost za postavitev PV-sistemov. Na podlagi določenih vrednosti PV-potencialov je izbranih deset streh (oz. skupin streh), ki pripadajo kategoriji z zelo visoko vrednostjo sončnega obsevanja in so posledično najprimernejše za postavitev PV-sistemov.



Slika 1: Kategorizacija streh v Mariboru glede na vrednosti sončnega obsevanja [7]

3 TESTNI MODELI OMREŽIJ

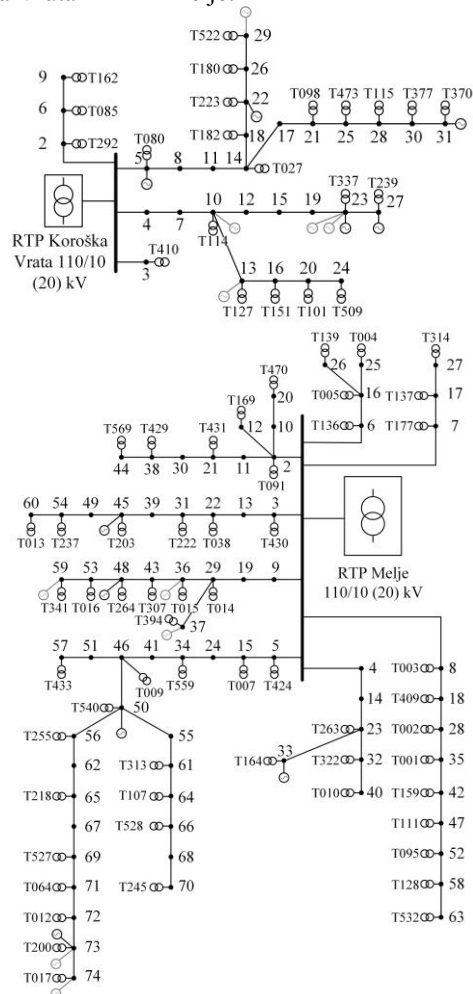
Del DO na levem bregu reke Drave v Mariboru, obravnavan v tem prispevku, je prikazan na sliki 2. Prikazani so vsi obstoječi elementi in povezave, ki med



◆ RTP postaje ■ Koroška Vrata TP ■ Melje TP ● Obstoječi RV — SN odseki — NN odseki ■ Izbrane lokacije za postavitev dodatnih SE

Slika 2: Del DO Maribora na levem bregu reke Drave

normalnim obratovanjem niso nujno hkrati aktivni. S temnimi poligoni so označene tudi strehe oz. skupine streh, izbrane kot najprimernejše za postavitev PV-sistemov. Izkaže se, da večino časa dela omrežja, priključena na RTP Koroška Vrata in RTP Melje, obratujeta ločeno drug od drugega in ni prisotno zankanje. Zato je izračune obratovalnih stanj mogoče opraviti neodvisno za oba dela obravnavanega dela SN DO. V ta namen sta pripravljena dva neodvisna modela radialnih SN-omrežij (slika. 3), napajana prek RTP Koroška Vrata in RTP Melje.



Slika 3: Skica SN DO, povezanih na RTP Koroška Vrata in RTP Melje

Uporabljena sta modela trifaznih simetričnih omrežij. Nizkonapetostni odseki vodov so zanemarjeni, moči priključenih bremen in RV pa so upoštevani na SN-omrežju. Na sliki 3 je označeno, v katere SN/NN transformatorje je na nizkonapetostni strani v omrežje priključen že obstoječi RV, v izračunu pa smo upoštevali le proizvodnjo SE. S sivo barvo je označena lokacija priključitve dodatnih PV-sistemov, izbranih v drugem poglavju. Pet izmed desetih izbranih lokacij (poligoni od 1 do 5, na sliki. 2), so priključeni v omrežje RTP Koroška Vrata, pet pa v omrežje RTP Melje (poligoni od 6 do 10, na sliki. 2).

4 POSTOPEK DOLOČITVE LETNIH PRIHRANKOV ENERGIJE

Določitev letnih prihrankov energije v omrežjih RTP Koroška Vrata in RTP Melje je izvedena s pomočjo časovno diskretnih izračunov obratovalnih stanj. Uporabljena je direktna metoda za izračun pretokov energije [8], s katero računamo vrednosti prenosnih izgub v omrežju.

Na podlagi 24 izračunov pretokov energije smo določili prenosne izgube v sistemu za vsako uro povprečnega dneva v mesecu (delovnika in vikenda). Razlika površin pod krivuljami izgub pri obstoječem stanju v omrežju in pri upoštevanju dodatne proizvodnje izbranih PV-sistemov pomeni dnevno prihranjeno energijo. Ta prihranek energije je rezultat zmanjšanja prenosnih izgub v omrežju zaradi vključitve dodatnih proizvodnih enot. Če poznamo energijo, prihranjeno med povprečnim delovnikom in vikendom za vsak mesec, lahko ovrednotimo letne prihranke energije kot večkratnik dnevnih prihrankov in ustreznega števila dni v mesecu.

4.1 Podatki porabe

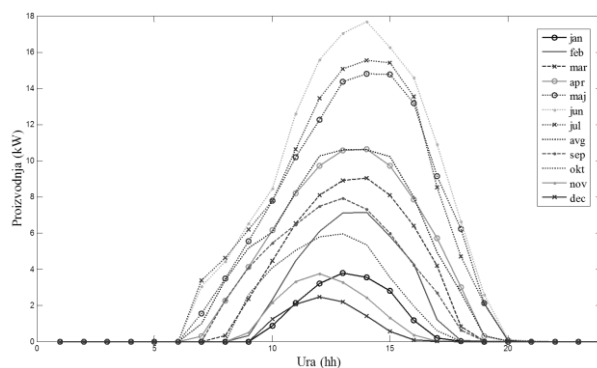
Na podlagi kombinacije podatkov lastnih meritev in študije izdelave nadomestnih obremenitvenih diagramov za slovensko distribucijsko omrežje [9] so bili določeni nadomestni profili porabe za povprečni delovnik in vikend vsakega meseca. Tako je bilo za eno leto določenih 24 normiranih profilov porabe.

Obremenitvene diagrame smo normirali in jih na podlagi tipov odjemalcev, priključenih na NN-stran transformatorskih postaj, razvrstili glede na dejavnosti, ki jih opravlja večina priključenih odjemalcev (večinoma stanovanjski, industrijski, rekreativno/kulturno/športni objekti). Nato smo diagrame ustrezno dodelili vsem vozliščem na podlagi tipov odjemalcev. V vsakem vozlišču s priključenim transformatorjem nazivne moči $S_{T,N}$ izbrani diagram skaliramo z močjo S_T , dobljeno na podlagi podatkov o nazivnih močeh n priključenih transformatorskih postaj ter predpostavljenih moči na posameznih izvodih iz RTP, S_i (1).

$$S_T = S_{T,N} \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_{T,N,i}} \quad (1)$$

4.2 Podatki dodatne proizvodnje

V drugem poglavju so bile izbrane strehe oz. skupine streh, najprimernejše za postavitev SE, gledano s stališča PV-potenciala. Podatki desetletnega zajemanja vrednosti sončnega obsevanja so uporabljeni za določitev povprečnih profilov proizvodnje, ki bi jih bilo mogoče doseči s postavitvijo monokristalnih sončnih modulov. Za vsak mesec nato določimo profil povprečne dnevne proizvodnje, sestavljen iz 24 enournih podatkov. Slika 4 prikazuje primer določenega povprečnega profila porabe za strehe zajete s poligonom 7.



Slika 4: Povprečni dnevni diagrami proizvodnje za poligona 7

5 REZULTATI

Namen tega prispevka je ovrednotenje letnih prihrankov energije ΔW_{izg} , dobljenih na račun zmanjšanja prenosnih izgub v omrežjih RTP Koroška Vrata in RTP Melje, zaradi dodatne vključitve PV-sistemov na izbrane lokacije. Na podlagi časovno diskretnih izračunov pretokov energije so določene prenosne izgube povprečnega delovnika $P_{izg,del}$ in vikenda $P_{izg,vik}$, v vsaki uri (t), vsakega meseca (m). Ob upoštevanju števila delovnih ($N_{del,m}$) in nedelovnih dni ($N_{vik,m}$) za vsak mesec leta 2013 so letne izgube energije določene, po (2).

$$W_{izg} = \sum_{m=1}^{12} \left(N_{del,m} \int_{t=0}^{24} P_{izg,del} dt + N_{vik,m} \int_{t=0}^{24} P_{izg,vik} dt \right) \quad (2)$$

Pri izračunu izgub v omrežju sta bila upoštevana naslednja scenarija:

- V omrežju obstajajo samo dejansko priključeni elementi – določitev W_{izg_dej} .
- V omrežju obstajajo dejansko priključeni in dodatni PV-sistemi, postavljeni na izbrane lokacije – določitev W_{izg_dodPV} .

Dodatne proizvodne enote proizvajajo delovno moč po podanem profilu proizvodnje (podpoglavje 4.2). V skladu z navodili za priključevanje in obratovanje elektrarn do moči 10 MW [10] morajo biti priključeni PV-sistemi sposobni obratovati s faktorjem $\cos(\varphi)$ do vrednosti 0,8 oz. z drugimi besedami, morajo biti sposobne proizvajati jalovo moč do vrednosti 75 % delovne moči. Zato so pri generaciji jalove moči upoštevani različni večkratniki delovne moči – v intervalu od 0 do 0,75, po koraku 0,25. V modelih omrežij so bremena induktivne narave. Zato je generirana jalova moč le kapacitivne narave, ker bi v primeru generacije jalove moči induktivne narave dodatno povečevali prenosne izgube v omrežjih [6].

Tabela 1: Prenosne izgube energije za povprečni delovni dan v mesecu, RTP Koroška Vrata

	Dnevne izgube – originalno omrežje (kWh)	Dnevne izgube – dodatni PV-sistemi (kWh)
Januar	82,71	81,48
Februar	81,41	79,41
Marec	61,19	58,52
April	44,47	41,85
Maj	33,54	30,71
Junij	36,57	33,35
Julij	37,55	34,20
Avgust	39,58	36,63
September	35,60	33,41
Oktober	46,08	44,19
November	66,90	66,02
December	81,90	82,12

Tabela 2: Prenosne izgube energije za povprečni delovni dan v mesecu, RTP Melje

	Dnevne izgube – originalno omrežje (kWh)	Dnevne izgube – dodatni PV-sistemi (kWh)
Januar	139,54	138,55
Februar	131,11	129,44
Marec	107,12	104,83
April	63,11	60,83
Maj	41,65	39,14
Junij	39,34	36,49
Julij	35,94	33,13
Avgust	36,13	33,74
September	38,63	36,88
Oktober	60,36	58,89
November	98,30	97,55
December	123,71	123,21

Vrednosti prenosnih izgub energije v povprečnem delovniku vsakega meseca, za originalno omrežje in omrežje z upoštevanimi dodatnimi proizvodnimi enotami, so prikazani v tabeli 1 za omrežje RTP Koroška Vrata in v tabeli 2 za omrežje RTP Melje.

Celoletni prihranki energije, pridobljeni na račun zmanjšanja prenosnih izgub v omrežju zaradi vključitve dodatnih PV-sistemov in ob upoštevanju različne stopnje generacije jalove moči iz dodatnih RV, so predstavljeni v tabeli 3 za omrežje RTP Koroška Vrata in v tabeli 4 za RTP Melje. Vidimo, da je z večjo generacijo jalove moči mogoče še nekoliko povečati prihranke energije v omrežju. Pri tem je treba poudariti, da so v podnih rezultatih upoštevani le prihranki energije v sredjenapetostnem omrežju. Glede na [3] je mogoče pričakovati bistveno večje prihranke energije v nizkonapetostnih omrežjih, kar pa v tem delu ni upoštevano.

Tabela 3: Letni prihranki energije zaradi upoštevanja dodatnih proizvodnih enot, RTP Koroška Vrata

$Q_{gen} = qP_{gen}$	Scenarij 1	Scenarij 2	Letni prihranki izgub	
			W_{izg_dej} [MWh]	W_{izg_dodPV} [MWh]
0,00	17,90	17,15	0,75	4,17
0,25		17,12	0,78	4,35
0,50		17,09	0,80	4,49
0,75		17,07	0,82	4,60

Tabela 4: Letni prihranki energije, zaradi upoštevanja dodatnih proizvodnih enot, RTP Melje.

$Q_{gen} = qP_{gen}$	Scenarij 1	Scenarij 2	Letni prihranki izgub	
			W_{izg_dej} [MWh]	W_{izg_dodPV} [MWh]
0,00	26,11	25,47	0,64	2,43
0,25		25,44	0,66	2,53
0,50		25,43	0,68	2,59
0,75		25,42	0,69	2,63

6 SKLEP

V prispevku je predstavljen vpliv generacije delovne in jalove moči dodatnih proizvodnih enot, priključenih v del SN-omrežja na levem bregu reke Drave v Mariboru, na zmanjšanje prenosnih izgub in posledično doseganje prihrankov energije v omrežju. Na podlagi ocene sončnega in fotonapetostnega potenciala streh v središču Maribora je bilo izbranih deset streh (oz. skupin streh), najprimernejših za postavitve SE. Nato je bil ovrednoten njihov vpliv na letne prihranke energije izključno v sredjenapetostnem omrežju. Pri tem prihranki energije zaradi zmanjšanja izgub na transformatorjih SN/NN in v nizkonapetostnem omrežju niso vključeni v obravnavo.

Rezultati kažejo, da bi bilo mogoče z inštalacijo dodatnih PV-sistemov v primeru RTP Koroška Vrata doseči 4,17-odstotni, pri RTP Melje pa 2,43-odstotni

prihranek energije glede na izgube v omrežju brez dodatnih proizvodnih enot. Te vrednosti je mogoče dodatno nekoliko povečati z večjo generacijo jalove moči kapacitivne narave, dodatno priključenih proizvodnih enot. Čeprav je skupna priključenost dodatnih proizvodnih enot v omrežju RTP Koroška Vrata (155 kWp) manjša kot v omrežju RTP Melje (225 kWp), so dobljeni prihranki energije večji. RTP Koroška Vrata je manj obremenjena, vendar tudi prostorsko bolj razpršena proizvodnja, priključenost proč od RTP, zaradi manjših tokov skozi večji del omrežja pa pripomore k zmanjšanju izgub.

Z razvojem DO se razvijajo tudi napredni sistemi vodenja, ki bodo na podlagi sprotnega ovrednotenja obratovalnih stanj v omrežju lahko zagotavljali optimalna obratovalna stanja omrežja. Na podlagi izračunov optimalne generacije jalove moči, ki se prilagaja dejanskim, trenutnim potrebam omrežja, bi se lahko za izbrani časovni interval dobilo stanje, pri katerem so zagotovljene najmanjše izgube v omrežju, hkrati pa bi zagotovili vrednosti vseh drugih obratovalnih parametrov, predvsem napetostnega profila, v predpisanih mejah. Tako bi bili tudi prihranki energije na letni ravni večji. Z upoštevanjem izgub v nizkonapetostnem omrežju in v transformatorjih SN/NN pa bi bili ti prihranki še znatno večji.

LITERATURA

- [1] I. Vera, L. Langlois. "Energy indicators for sustainable development." *Energy* Vol. 32, Issue 6, str. 34–43, 2007.
 - [2] S. Weckx, C. Gonzalez, J. Driesen. "Combined Central and Local Active and Reactive Power Control of PV Inverters," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 5, No. 3, pp. 776–784, 2014.
 - [3] E. Belič, K. Dežan, J. Voh, N. Lukač, N. Srečković, P. Sukič, K. Deželak, I. Dovnik, I. Zadavec, M. Miklavčič, G. Štumberger. "Vpliv generacije jalove moči sončnih elektrarn na nizkonapetostno distribucijsko omrežje". V: ZORMAN, Marjan (ur.). 36. Kotnikovi dnevi, Radenci, 26. in 27. marec 2015. Maribor: Elektrotehniško društvo, 2015, str. 1–14.
 - [4] M. Kolenc, I. Papič, B. Blažič. "Coordinated reactive power control to achieve minimal operating costs," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 63, pp. 1000–1007, 2014.
 - [5] S. Kucuksari, A. M. Khaleghi, M. Hamidi, Y. Zhang, F. Szidarovszky, G. Bayraksan, Y. J. Son. "An Integrated GIS, optimization and simulation framework for optimal PV size and location in campus area environments." *Applied Energy*. Vol. 113, pp. 1601–1613, 2014.
 - [6] N. Srečković, G. Štumberger "The impact of photovoltaic systems on power losses and voltage profiles in a real medium voltage distribution network", V: *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'15)*, La Coruña, 25-27 Marec, 2015.
 - [7] N. Lukač, D. Žlaus, S. Seme, B. Žalik, G. Štumberger. "Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data" *Applied energy*, zv. 102, str. 803-812, 2012.
 - [8] J. H. Teng, "A direct approach for distribution system load flow solutions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, zv. 18, št. 3, str. 882-887.
 - [9] Študijska naloga, Izdelava nadomestnih obremenitvenih diagramov za slovensko distribucijsko omrežje, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2004.
 - [10] SODO, Priloga 5: Navodila za priključevanje in obratovanje elektrarn do moči 10 MW, Maribor, SODO, 2010.
- Nevena Srečković** je končala prvo (2011) in drugo (2014) bolonjsko stopnjo študijskega programa elektrotehniko na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Od leta 2014 je zaposlena kot mlada raziskovalka v Laboratoriju za energetiko, Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerze v Mariboru. Njena raziskovalna zanimanja vključujejo modeliranje in analizo obratovanja distribucijskih omrežij.
- Niko Lukač** je diplomiral (2010) in magistriral (2012) na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Trenutno je zaposlen kot mladi raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Njegovo raziskovalno delo obsega splošno programiranje grafičnih procesnih enot, obdelavo daljinsko pridobljenih podatkov in modeliranje ter simulacijo obnovljivih virov električne energije.
- Gorazd Štumberger** je diplomiral (1989), magistriral (1992) in doktoriral (1996) na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Zaposlen je kot redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Njegovo raziskovano področje obsega prenos električne energije in modeliranje, analizo ter vodenje elementov elektroenergetskega sistema.