

# Komunikacijski – nadzorni koncept v distribucijskem omrežju z razpršenimi viri

Jure Močnik<sup>1</sup>, Andrej Žemva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RC eNeM in Iskra Sistemi, Ljubljanska cesta 24a, Kranj

<sup>2</sup>Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, Ljubljana

E-pošta: jure.mocnik@iskra-mis.si

**Povzetek.** V delu je predstavljen komunikacijski nadzorni koncept elektroenergetskega omrežja z razpršenimi viri, ki ureja in nadzira napetostni profil omrežja. Komunikacijski koncept temelji na hitrih povezavah med kontrolnimi točkami na napetostnih vodih, razpršenih virih ter območnimi kontrolnimi centri. Prednost predstavljenega koncepta je v vzpostavitvi komunikacij med vsemi elementi elektroenergetskega omrežja (med razpršenimi viri, glavnimi napetostnimi vodi, nadzornimi centri in končnimi porabniki), ki omogočajo neomejeno brezpogojno medsebojno komunikacijo brez časovnih določil. Koncept vsebuje tudi možnost integracije v obstoječi standard IEC 61850.

**Ključne besede:** razpršeni viri, pametna omrežja, IKT, IEC 61850

## Communication-control concept in distribution network with dispersed energy resources

This paper describes a communication concept in distribution network with dispersed energy resources (DER), which regulates and controls voltage profile in the power network. The communication concept is based on fast links between checkpoints on power lines and on DER. Advantage of this concept is establishing communication among all DER, main power lines and control center, which allows them to communicate with each other at any given time without any restrictions. Another advantage of the proposed communication concept involves possibility of upgrading to the existing standard IEC 61850.

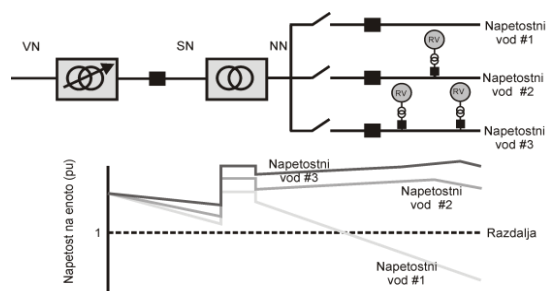
## 1 UVOD

Vsesplošna rast gospodarstva in navade porabnikov povzročajo rast porabe električne energije (EE) za približno 1.7 % na letni ravni. To pomeni, da se je v obdobju 1997–2007 poraba EE povečala za 32.8 % [1]. To dejstvo sili inženirje v izboljšavo distribucijskega omrežja (DO) in v povečanje proizvodnje EE. Ta problem je mogoče rešiti s priključitvijo malih vetrnih, sončnih in vodnih elektrarn, tako imenovanih razpršenih virov (RV), v obstoječe srednje- (SN) in nizkonapetostno (NN) DO [2]. Žal ta rešitev vključuje tudi stranske učinke, kot so: zmanjšanje zanesljivosti in stabilnosti obstoječega omrežja in nelinearno spreminjanje napetostnega profila [3] vzdolž napajalnega voda (NV).

V energetskega omrežju brez RV se je problem napetostnega profila reševal v razdelilni transformatorski postaji (RTP), kjer se je napetost

regulirala za vse napetostne vode ene RTP sočasno. Ta pristop je v DO z RV neprimeren zaradi spremenjene strukture omrežja, saj ni oblikovan tako, da so na eni strani proizvajalci EE in na drugi porabniki. Obstoječe omrežje ima veliko dobrih lastnosti, ena izmed njih je linearno zmanjševanje napetosti z oddaljenostjo od RTP. V takem omrežju je moral distributer zagotoviti, da je napetostni profil na NN-omrežju znotraj predpisanih meja, kar se je naredilo z dinamično konfiguracijo bremenskega odcepnega preklopnika (OLTC [4]) v RTP in s fiksno konfiguracijo odcepnov v transformatorski postaji (TP). Z dodajanjem RV v SN in NN DO postane dosedanja postopek nadziranja napetostnega profila nezadosten, saj je proizvodnja EE razdružena in neenakomerno porazdeljena na NV.

Slika 1 prikazuje preprost primer DO z RV, ki je sestavljen iz enega RTP in iz treh NV, ki imajo različno število RV na različnih lokacijah vzdolž NV. Vsak RV, ki je priključen na omrežje, linearno zvišuje napetost vzdolž voda in pomeni lokalni ekstrem v grafu napetostnega profila.



Slika 1: Napetostni profil brez kakršnih koli posegov

Na grafu na sliki 1 so prikazani napetostni profili vodov, na katerem lahko opazujemo, kako se spreminjajo glede na razdaljo od RTP. S svetlo sivo



je oblikovan na podlagi prisotnosti in lokacije RV oziroma napetostnih bremen. Na sliki 4 so prikazani primeri napetostnih profilov z različno velikimi RV. Odvisno od količine trenutno dostavljene moči se lahko RV razvrstijo v štiri skupine (nedejavni, mali, srednji in veliki). Vsaka skupina ima svojo karakteristiko in svoj vpliv na napetostni profil, ki zahteva različne pristope k rešitvi problema.

Začetek pridobivanja informacij je v vseh primerih enak. Vsak VSM si naredi svoje polje (3) podatkov, ki je sestavljeno iz dneva v tednu, časa meritve (minutni interval) in posamezne meritve (moč, napetost, tok, ...). Pridobljeni podatki se povprečijo tako, da se dobijo povprečne vrednosti za vsako uro, dan, delovne dneve in vikende glede na mesec ter letni čas.

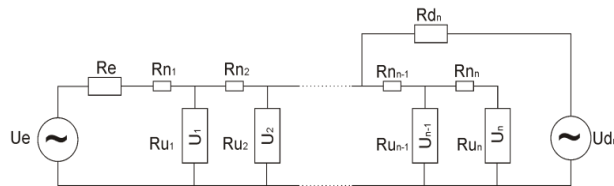
$$\begin{bmatrix} Mo \\ Tu \\ \dots \\ Sa \\ Su \end{bmatrix} * [00.00 \ 00.01 \ \dots \ 23.59] * P = \begin{bmatrix} 10,43 & \dots & 42,40 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 34,35 & \dots & 45,68 \end{bmatrix} \quad (3)$$

V podobna polja se beležijo tudi maksimalne vrednosti drugih parametrov v vseh zgoraj omenjenih časovnih intervalih, kar je narejeno izključno zaradi izdelave določenih smernic pri porabi električne energije in za napovedovanje energijskih rezerv, ki se izračunajo na podlagi enačbe (4). V (4) pomeni  $P_{all}$  celotno energijo, ki je seštevka porabljene energije ( $P_{use}$ ) in energije ( $P_{res}$ ), ki jo moramo imeti v zalogi. Ta se izračuna s povprečjem porabljene energije zadnje ure ( $P_{avgH}$ ) in maksimalno vrednostjo energije ( $P_{maxH}$ ), ki je bila izmerjena v preteklih tridesetih dneh. Dobljeno vrednost povečamo še za 20 %.

$$P_{all} = P_{use} + P_{res} = ((P_{avgH} + P_{maxH}) / 2) * 1.2 \quad (4)$$

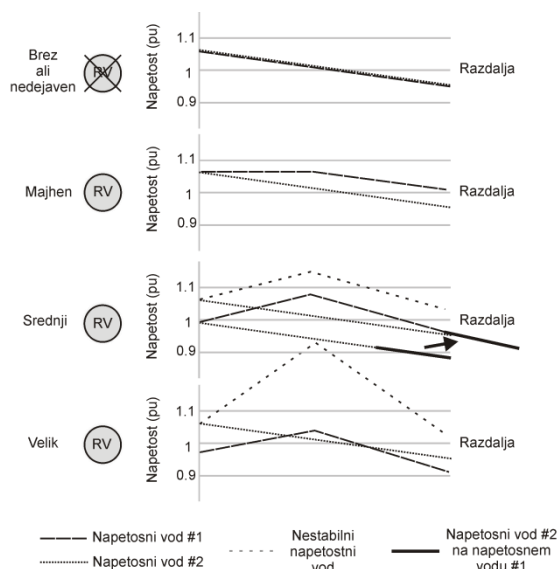
V primeru, ko je RV priključen v omrežje in je nedejavni, je nadzor napetostnega profila relativno preprost. Paziti moramo le, da napetost na začetku in na koncu vseh NV ne pade ali zraste nad zakonsko določeno vrednost. V ta namen so vzdolž voda vgrajeni VSM, ki dajejo informacije o stanju omrežja. Vsi VSM pošiljajo trenutne meritve VSM v RTP in tistim VSM, ki potrebujejo te informacije (glede na topografijo omrežja). Mehanizmi v VSM RTP imajo prednastavljene limite, ki določajo, v katerih območjih morajo meritve biti. Če pride do odstopanj, VSM izračuna nove nastavitve OLTC, ki nastavi primerno prestavno razmerje in s tem določi začetno vrednost napetosti na vseh NV.

Podoben postopek je tudi, če je na vodu priključen majhen RV [7]. Edina razlika je v tem, da VSM, ki je v RTP zaznal prisotnost RV s pomočjo drugih VSM, ki so nameščeni na vodu, in z nadomestnim vezjem (slika 3) izračuna, kakšne bi bile razmere v omrežju ob predvidenem preklopu. Če so vsi izračunani parametri znotraj meja, VSM potrdi prekllop.



Slika 3: Nadomestno vezje za izračun situacij

Razmere postanejo bolj zapletene, če je v omrežje umeščen srednje velik RV. Te razmere lahko vidimo na tretjem grafu slike 4 s črtkano črto, kjer je prikazano, kakšen je napetostni profil, če ni nikakršnega posredovanja (več kot tretjina uporabnikov na prvi liniji ima neprimerno napetost). Če bi se sistem odzval na enak način kot v prejšnjih primerih (OLTC zniža začetno vrednost), bi imeli uporabniku na koncu voda 2 nižjo napetost od zakonsko dovoljene. Tu pride predlagani koncept do največje veljave. Vsi VSM, ki so nameščeni na vodu, pošljejo meritve ACC, ta zazna, da vrednost parametra kmalu ne bo v zakonskih mejah, in zato izračuna nove parametre na podlagi preklopa OLTC (kot v prejšnjih primerih). Če so izračunani parametri še vedno zunaj meja in OLTC nima pravega prestavnega razmerja, potem OLTC nastavi najvišje mogoče razmerje, pri katerem je najmanj uporabnikov zunaj meja in določi, pri katerem VSM to izvede. VSM izklopi del voda, kjer napetost ni prava, in to ugotovitev pošlje VSM v RTP, ki določi, na kateri vod se bo priklopil izklopljeni del, da bo napetostni profil voda znotraj meja, kar povzroči, da imajo vsi vodi primeren napetostni profil.



Slika 4: Mogoči napetostni profili v DO glede na velikost RV

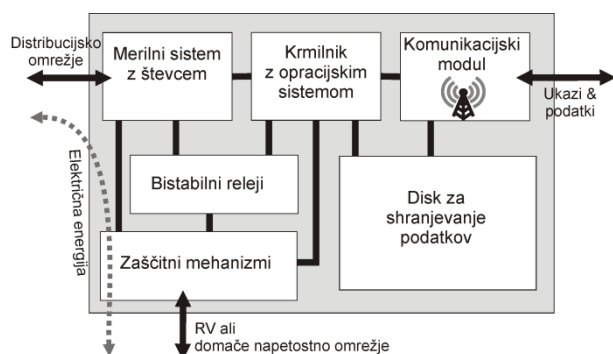
Obstaja še primer, ko je v omrežje nameščen velik RV ali pa je priključena virtualna elektrarna [8], ki povzroči, da napetost preseže vse meje tolerance. Sistem se odzove podobno kot v prejšnjem primeru, vendar OLTC ne more nastaviti pravega razmerja za odklop dela voda. To odločitev VSM v RTP pošlje

VSM na vodu, kjer bo napetost prestopila mejo, in sistem začne preračunavati, za kolikšen del voda lahko RV samostojno napaja. Če ima RV dovolj moči, pošlje to informacijo VSM v RTP, ki mora to odločitev tudi potrditi, da pride do dejanskega odklopitve voda. Tako deluje ta del kot zasebno oziroma otočno omrežje, kar v trenutni zakonodaji ni dovoljeno, vendar se bo moralo to spremeniti, če bo država hotela množično vpeljati RV.

Prednost tega sistema in metodologije delovanja je v vzpostavitvi boljšega nadzora nad RV in DO, kar posledično prinaša optimizacijo le-tega, kar se kaže predvsem v zmanjšanju energetskih zalog. Predlagani koncept tudi posodablja infrastrukturo omrežja, na katero lahko poljubno priklopimo vse RV ne glede na instalirano moč.

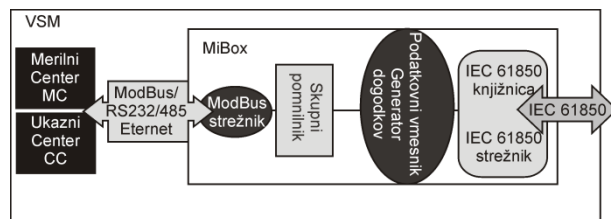
#### 4 STRUKTURA VMESNIKA STIČNEGA MESTA

Predlagani koncept je predstavljen s prototipnim sistemom VSM, ki je sestavljen iz strojne in programske opreme. Slika 5 prikazuje glavne komponente in povezave med njimi. Glavna komponenta VSM je nadzorni krmilnik, na katerem je nameščen operacijski sistem linux (Ubuntu), in ima možnost programiranja digitalnih izhodov in vhodov, ki lahko krmilijo bistabilne releje. Ti releji opravljajo različne naloge glede na tip VSM.



Slika 5: Strojna struktura VSM

VSM vsebuje tudi števec porabljene električne energije, ki je nadgrajen v merilni center in ima možnost meritve kakovosti električne energije po standardu SIST EN 50160. Vse pridobljene informacije se prek krmilnika shranijo na disk (večja zanesljivost sistema in arhiviranja podatkov). Za prenos podatkov do ACC in do končnih porabnikov skrbi komunikacijski modul (ethernet, GPRS ali WiFi), ki ima neposreden dostop do podatkov, shranjenih na disku, do katerih je mogoče dostopati v internetni aplikaciji. Komunikacija med VSM in ACC temelji na ethernetu, ki uporablja zasebno omrežje (PN) [9] ali pa GPRS [10] povezavo na osnovi standarda IEC 61850.



Slika 6: Programska struktura VSM

Slika 6 prikazuje glavne programske komponente VSM in povezave med njimi. Komponente so razdeljene na dva dela, ki si delita pomnilnik. Prvi del je odgovoren za zbiranje meritev (MC) in izvajanje ukazov (CC), ki jih pošljemo v programsko središče, imenovano MiBox. Drugi del programske strukture pa deluje kot nekakšen semafor in razvršča podatke glede na vrsto namestitve VSM ali pa pošlje podatke ACC. Na sliki 2 vidimo, da obstaja pet različnih VSM – VSM TP za TP, VSM RV za RV, VSM UPR za končne porabnike, VSM RTP za RTP, VSM V za EV. Ko so podatki pravilno razvrščeni, aplikacija podatke kodira v skladu s standardom IEC 61850 ter jih pošlje prej določenim prejemnikom.

#### 5 INTEGRACIJA V STANDARD IEC 61850

Da bi bil sistem bolj prepoznaven in uporaben, ga je mogoče integrirati v že obstoječi standard IEC 61850 [11], ki je namenjen energetskemu sektorju za komunikacije znotraj energetskih objektov [12] in omrežij. Standard IEC 61850-7-420 [13] je sestavljen iz številnih vnaprej določenih logičnih vozlišč (LN), ki nadzorujejo določeno področje. Ker je standard relativno nov, še ne vključuje vseh možnosti, ki jih ponuja sodobno DO. Eden manjkajočih LN je vozlišče za nadzor omrežnega napetostnega profila [14], ki je tudi predlagan in prikazan – imenujemo ga Voltage Profile LN (VP LN).

V tabeli 1 je predstavljen nov razred LN SCP, ki vsebuje vse informacije za nadziranje napetostnega profila v DO. Ena izmed posebnosti tega LN je visoka prioriteta aktiviranja, kar pomeni, da se povezava sproži z aktiviranjem določenega alarma.

Koncept integracij novih LN v standard IEC 61850 prinese nove izzive, ki jih v tem prispevku ne obravnavamo. V energetskem okolju že obstaja standard, ki določa komunikacije med TP (IEC 61850-90-1) in med ACC ter TP (IEC 61850-90-2), vendar manjkajo le še deli standarda, ki bodo določali protokol pri končnem porabniku in bodo določali osebna LN ter njihovo medsebojno komunikacijo. Z določitvijo še teh manjkajočih delov standarda IEC 61850 bo družina standarda zaključena in bo vključevala celoten energetski sektor (od proizvajalca do končnega porabnika), kar bo vodilo k poenostavitvi komunikacije v DO in razpoznavnosti omenjenega standarda.



Tabela 1: Predlagano logično vozlišče (razred SCP)

| SCP class                                                         |           |                                                     |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------|
| DATA Class                                                        | Attr.Type | Explanation                                         |
| Common Logical Node Information                                   |           |                                                     |
| LN shall inherit all Mandatory Data from Common LogicalNode Class |           |                                                     |
| System information                                                |           |                                                     |
| SupStat                                                           | SPS       | Superior station                                    |
| NumStat                                                           | SPS       | Number of stations in system                        |
| Status information                                                |           |                                                     |
| AuProAvail                                                        | SPS       | Auto-protection available                           |
| PLPAva                                                            | SPS       | Power line protection available                     |
| DERAva                                                            | SPS       | DER protection available                            |
| NumDNet                                                           | SPS       | Number of DER in network                            |
| Location information                                              |           |                                                     |
| DEROn                                                             | SPS       | Manage DER                                          |
| PLOn                                                              | SPS       | Manage power line                                   |
| PLNum                                                             | SPS       | Power line number                                   |
| SeNumDER                                                          | SPS       | Serial number of DER (only for substation with DER) |
| Measured values                                                   |           |                                                     |
| A                                                                 | WYE       | Phase current (IL1, IL2, IL3)                       |
| U                                                                 | WYE       | Phase voltage (U1, U2, U3)                          |
| W                                                                 | WYE       | Phase active power (P1, P2, P3)                     |
| Protection Commands                                               |           |                                                     |
| ActDER                                                            | SPC       | Activate DER                                        |
| DeActDER                                                          | SPC       | Deactivate DER                                      |
| ActPL                                                             | SPC       | Activate power line                                 |
| DeActPL                                                           | SPC       | Deactivate power line                               |
| Alarms information                                                |           |                                                     |
| Aon                                                               | SPS       | Alarm is activated                                  |
| Aoff                                                              | SPS       | Alarm is deactivated                                |
| Aover                                                             | WYE       | Exceeded value of current                           |
| Asig                                                              | SPC       | Sign of the exceeded value                          |
| ANum                                                              | SPS       | Which substation has first spotted alarm            |

↑
↑  
 Data Name      Common Data Class

## 6 SKLEP

Vključevanje RV v DO postaja vsakdanji pojav, ki vpliva na obstoječe stabilno in zanesljivo omrežje. Kljub zaprtemu okolju, v katerem deluje, je treba zagotoviti, da motnje, ki jih vnašajo RV, ne bodo vplivale na razmere v omrežju. Te razmere je mogoče rešiti s pomočjo elektrotehniških in komunikacijskih mehanizmov, ki tvorijo IKT. S postavitvijo IKT in s primernim programskim paketom lahko pridobimo boljši nadzor nad DO in dostopnost do podatkov končnih porabnikov s pomočjo spletne aplikacije, ki dovoljuje spremljanje in nastavljanje določenih meritev oz. nastavitev. V članku je predstavljen komunikacijski nadzorni koncept, ki se uporablja za nadzor napetostnega profila na SN- in NN-omrežju, ki zazna tudi težave, ki nastajajo v DO.

Predlagani koncept ima prednost pred obstoječimi rešitvami [15]-[18] pri boljšem distribuiranju in porabljanju električne energije, saj ne uporablja vložka jalove energije, algoritmov za nadzor aktivnih in jalovih bremen, regulatorjev napetosti in napetostnih kompenzatorjev, temveč samo prestavi vir voda, ki potrebuje energijo, in ne spremeni moči delovanja RV. Ena izmed posebnosti tega koncepta je možnost integracije v obstoječi standard IEC 61850.

## LITERATURA

- [1] Eurostat (2012, Jun.) – Energy statistic - quantities, European Commission, Europe [Online]. Dosegljivo na: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/introduction>
- [2] C. Wei, "A Conceptual Framework for Smart Grid," predstavljeno na 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Chengdu, China, 2010.
- [3] T. Ackermann, G. Andersson in L. Soder, "Distributed generation: a definition," in *2001 Electric power systems research* 57, pp. 195–204.
- [4] M. Joorabian, M. Ajodani, in M. Baghdadi, "A method for voltage regulation in distribution network equipped with OLTC transformers and DG units," predstavljeno na 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Chengdu, China, 2010.
- [5] D. Uthitsunthorn in T. Kulworawanichpong, "Distance protection of a renewable energy plant in electric power distribution systems," predstavljeno na 2010 International conference on Power System Technology (POWERCON), Hangzhou, China, 2010.
- [6] H. A. Attia, "Optimal voltage profile control and losses minimization of radial distribution feeders," predstavljeno na 12<sup>th</sup> International Middle-East Power System Conference (MEPCOM), Aswan, Egypt, 2008.
- [7] Elektro Celje, Elektro Gorenjska, Elektro Ljubljana, Elektro Maribor in Elektro Primorska, "Navodila za priključevanje in obratovanje elektrarn inštalirane električne moči do 10 MW," Ljubljana, Slovenija, Okt. 2007.
- [8] C. Kieny, B. Berseneff, N. Hadjsaid, Y. Besanger in J. Maire, "On the concept and the interest of virtual power plant: Some results from the European project Fenix," predstavljeno na Power & Energy society general meeting (PES), Calgary, AB, Canada, 2009.
- [9] A. Kubota in Y. Miyake, "Public Key-based Rendezvous Infrastructure for Secure and Flexible Private networking," predstavljeno na IEEE International Conference on Communications (ICC), Dresden, Germany, 2009.
- [10] M. J. Madera in E. A. Canzales, "The GPRS Communication Platform and DNP Protocol as the Best Choices to Communicate the SCADA with IEDs in the EDC Distribution Network," predstavljeno na Latin America Transmission & Distribution Conference and Exposition (TDC), Caracas, Venezuela, 2006.
- [11] F. M. Cleveland, "IEC 61850-7-420 Communications Standard for Distributed Energy Resources (DER)," predstavljeno na Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century of Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, PA, United States, 2008.
- [12] R. Mackiewicz, "Overview of the IEC 61850 and Benefits," predstavljeno na Transmission and Distribution Conference and Exhibition (PES), Dallas, TX, United States, 2006.
- [13] IEC Communication networks and systems in substation, Part 7-420 Communications Systems for Distributed Energy Resources (DER) – IEC 57/818/CDV:2006, Okt., 2006.
- [14] A. P. Apostolov, "Modeling systems with distributed generators in IEC 61850," predstavljeno na 2009 Power Systems Conference (PSC), Clemson, SC, United States, 2009.
- [15] K. Samarakoon, J. Ekanayake in J. Wu, "Smart metering and self-healing of distribution networks," predstavljeno na 2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), Kandy, Sri Lanka, 2010.
- [16] K. K. Singh, R. Kumar in E. C. Jha, "Improvement of voltage profile in smart grid using voltage sensitivity approach," predstavljeno na 2012 Students Conference on Engineering and Systems (SCES), Allahabad, Uttar Pradesh, India, 2012.
- [17] A. A. Aquino-Lugo, R. Klump in T. J. Overbye, "A control framework for the smart grid for voltage support using agent-based technologies," in *2011 IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 173–180.
- [18] T. Sansawatt, J. O'Donnell, L. F. Ochoa in G. P. Harrison, "Decentralized voltage control for active distribution networks," predstavljeno na 44<sup>th</sup> International proceedings of the Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, United Kingdom, 2009.

**Jure Močnik** je študent doktorskega študija na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je diplomiral leta 2010. Od takrat je zaposlen kot raziskovalec v podjetjih Iskra Sistemi in RC eNeM. Njegova raziskovalna področja zajemajo nadzor kakovosti električne energije, porazdeljeno proizvodnjo električne energije ter nove koncepte pametnega distribucijskega omrežja.

**Andrej Žemva** je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko. V okviru znanstveno-raziskovalnega dela se posveča obdelavi signalov, standardizaciji, komunikaciji, sistemski sintezi in optimizaciji.