

LOKALNA REGULACIJA NAPETOSTI V PAMETNIH OMREŽJIH Z UPORABO ČASOVNO ODVISNEGA FAKTORJA MOČI

Marko KOLENC, Igor PAPIČ, Boštjan BLAŽIČ

POVZETEK

V članku je obravnavana tematika regulacije napetosti v distribucijskih omrežjih z razpršenimi viri (RV). Do nedavnega so novo nameščeni RV lahko obratovali s konstantnim faktorjem moči, ki je navadno znašal $\cos\varphi = 1$. Države po svetu že sprejemajo nova pravila, ki zahtevajo, da tudi RV sodelujejo pri regulaciji, ker so nenazadnje tudi glavni krivec za težave z napetostjo. Slovenija je že sprejela dokument, ki predpisuje različne statične karakteristike $Q(U)$, ki določajo faktor moči v odvisnosti od priključne napetosti.

Z razvojem tehnologije je dandanes mogoče vzpostaviti dvosmerno komunikacijo s centrom vodenja in RV. To pa omogoča, aktivnejše sodelovanje generatorjev pri regulaciji napetosti. Izdelan je bil koncept regulacije, ki temelji na izkoriščanju teh prednosti. Želeni $\cos\varphi$ se tako v določenih časovnih intervalih pošilja vsem generatorjem v omrežju. Izpostavljene so prednosti takšne regulacije. Na realnem distribucijskem omrežju so bile izdelane simulacije, ki kažejo na izredno fleksibilnost pri uporabi tovrstnih metod.

ABSTRACT

This paper deals with the influence of a large share of dispersed generation (DG) on a voltage profile in distribution networks. Until recently, the newly installed DG operated only with constant power factor, which was usually $\cos\varphi = 1$. Countries around the world are now accepting the new rules and guidelines, which require that all DG participate in the voltage regulation, as they are the main reason for the voltage rise in distribution networks. Slovenia has already issued a document that prescribes different static characteristics $Q(U)$, which determine the power factor of DG with respect to the voltage at the connection point.

As the new technologies nowadays allow bidirectional data flow in almost real time, more active participation of generators in voltage regulation is possible. Concept of voltage regulation which exploits these ideas is presented. At a certain intervals desired $\cos\varphi$ can be send to all generators in the network. Advantages of such a regulation are pinpointed out. Different solutions were evaluated by means of simulation on a real medium-voltage network, which demonstrate good flexibility when using such a methods.

1. UVOD

Distribucijska podjetja morajo regulirati napetost znotraj ozkih meja, kar je izredno pomembno za normalno obratovanje uporabniških bremen. Regulacija klasičnega distribucijskega sistema deluje centralno, zadnja merjena točka v sistemu je na sekundarni strani regulacijskega transformatorja v RTP-ju, ki glede na izmerjeno napetost določi napetostno stopnjo. Sistem je izdelan tako, da smemo trditi, da so napetosti v vseh točkah omrežja znotraj predpisanih meja [1] - [3], [8]. Ker se na distribucijska omrežja v zadnjem času priklaplja vse več razpršenih virov, kot so vetrne elektrarne, sončne elektrarne, alaktrarne na bioplin ipd., se ta koncept počasi podira. V prihodnosti lahko pričakujemo čedalje hitrejšo rast RV v omrežju. V [4] avtorji omenjajo, da je do sedaj trg s fotonapetostnimi elektrarnami sledil konstantnemu razvoju, ki ga lahko primerjamo z Moorovim zakonom iz mikroelektronike. »Fotonapetostni Moorov zakon« predvideva zmanjšanje stroškov fotovoltaične energije za 20 odstotkov z vsako podvojitvijo kumulativnih proizvodnih zmogljivosti. Z drugimi besedami, cene PV modulov se zmanjšajo za 8 odstotkov letno, kar pomeni prepolovno dobo približno osem let.

Distribucijska omrežja so načrtovana tako, da ne predvidevajo visokega deleža razpršene proizvodnje. Pri načrtovanju se predpostavi največja in najmanjša možna poraba, nakar se določi potrebne preseke vodnikov tako, da so napetosti vedno znotraj predpisanih meja. V primerih, kjer je v omrežju veliko razpršene proizvodnje, lahko pride do porasta napetosti, česar z meritvijo napetosti samo v RTP-ju ne moremo ugotoviti. To se zgodi v času velike proizvodnje iz RV in majhnega odjema, npr:

- močan veter v nočnih urah v primeru velikega št. vetrnih elektrarn,
- proizvodnja iz PV virov v opoldanskih urah v urbanem naselju.

Tradicionalna rešitev omenjene težave bi bila ojačenje elektroenergetskega omrežja z dodatnimi vodi in transformatorji oz. s povečanjem presekov in s tem predimenzioniranjem omrežja. Takšne rešitve so sicer zanesljive, vendar so zaradi okoljevarstvenih razlogov in zakonskih omejitev, v večini primerov izredno draga in ekonomsko neupravičena rešitev. Eden od alternativnih pristopov je izboljšana uporaba centralne regulacije napetosti z regulacijskim transformatorjem v RTP-ju in lokalne regulacije napetosti z jalovo energijo razpršenih virov, ki to omogočajo. Njuno pravilno in usklajeno obratovanje rešuje več težav v omrežju. V članku se osredotočamo na lokalno regulacijo napetosti. Pri tem glavni izziv predstavlja vodenje velikega števila majhnih virov električne energije. Razpršena proizvodnja ima lahko ob ustrezni regulaciji tudi pozitivne vplive na omrežje. Lahko prispeva k odložitvi investicij v distribucijska omrežja, zmanjša izgube in poveča zanesljivost dobave.

Koncept pametnih omrežij pomeni nadgradnjo koncepta obratovanja in načrtovanja sistema, ki v učinkovito celoto vključuje elemente sistema, tako klasične (centralizirane velike proizvodne enote, prenosno in distribucijsko omrežje) kot nove elemente, kot so razpršeni proizvodni viri, napredni sistemi merjenja, odjemalci, ki lahko sodelujejo s prilagajanjem porabe, virtualne elektrarne, infrastruktura za električne avtomobile in hranilniki električne energije. Omenjena tematika je ena izmed glavnih raziskovalnih in razvojnih prioritet v EU na

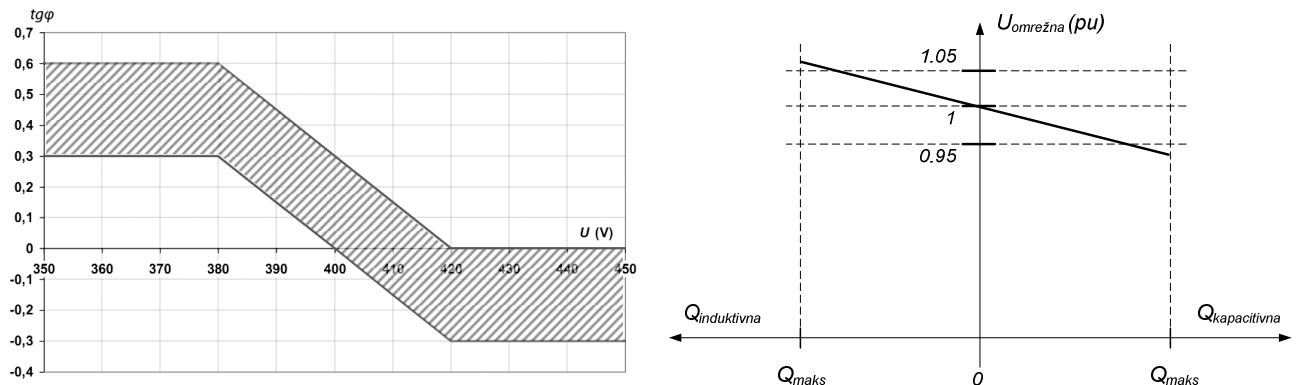
področju električne energije [6], ki vodijo k njeni energetski neodvisnosti in prehodu v nizko-ogljeno družbo.

Uporaba trenutnih vrednosti v omrežju zahteva napredne informacijske in komunikacijske tehnologije. Podatki iz merjenih naprav v omrežju morajo biti v čim krajšem možnem času poslani v zbirni center (center vodenja), kjer se obdelajo, iz tam pa se pošlje želene obratovalne točke nazaj do vseh generatorjev. Ena izmed tehnologij, ki veliko obetaja, je PLC (Power Line Communication) [10], ta izrablja obstoječe električne kable kot komunikacijski medij za prenos signalov od ene do druge naprave s pomočjo modulacijskih tehnik. Časovni zamiki so nekaj deset ms. Prednost tehnologije je ta, da je vsak uporabnik že povezan z električnim omrežjem, kar močno zniža stroške vzpostavitve sistema. Kitajska planira implementacijo več milijonov pametnih števecov, ki bodo izrabljali PLC tehnologijo, do leta 2015 [11]. Kot vse tehnologije, pa ima tudi ta določene slabosti, to so interferenčne motnje drugih uporabnikov spektra in s tem možna zmanjšana zanesljivost in močno dušenje pri prenosu na daljše razdalje.

2. LOKALNA REGULACIJA NAPETOSTI - SEDANJA PRAKSA

Do nedavnega so vsi RV delovali s konstantnim faktorjem moči ($\cos\varphi = 1$) in niso sodelovali pri regulaciji napetosti. Glede na to, da je ravno razpršena proizvodnja glavni krivec za poraste napetosti, je prav da za to prevzamejo določeno odgovornost in sodelujejo pri sistemskih storitvah. Zadnjih nekaj let se že pojavljajo zahteve v tej smeri. Tako so bila v Sloveniji leta 2011 izdana *Navodila za priključevanje in obratovanje elektrarn inštalirane električne moči do 10 MW*, kjer je bila določena statična $Q(U)$ karakteristika za razpršeno proizvodnjo. Na podlagi lokalne meritve napetosti in trenutne proizvodnje delovne moči razpršenega vira, se določi koliko jalove moči mora proizvajati razpršeni vir. Tako se lahko definira razmerje med jalovo in delovno močjo, ki ga zapišemo kot $\tan\varphi$. Primer dveh različnih statičnih karakteristik prikazuje sl. 1.

Takšna lokalna regulacija ima več pomanjkljivosti, kot je na primer nepotrebno injiciranje jalove moči (ko je napetost v okviru mej) in s tem povečanje izgub. Brez komunikacijskih povezav tudi ne moremo vplivati na njihovo delovanje oz. pomoč v primeru izrednih razmer. Ena izmed slabosti je tudi nepravilno razdelitev jalove moči. Če razpršeni viri delujejo po principu statične karakteristike, morajo viri, ki so bolj oddaljeni od RTP-ja vzdolž izvoda, proizvajati (tudi porabljati) več jalove moči, kar ima za posledico hitrejše staranje naprav (pretvornikov) in potrebno predimenzioniranje naprav. Mali odjemalci oz. proizvajalci po navadi nimajo izbire kje v električnem smislu vzdolž izvoda se nahajajo. Poleg tega različno prestrukturiranje omrežja pomeni drugačne zahteve za generatorje. Zato je nepravilno, da so odjemalci penalizirani na podlagi njihove lokacije. Primer nepravilne porazdelitve jalve moči prikazuje sl. 6 v poglavju 4, kjer so bile izdelane simulacije za različne vrste regulacij. Statičen način pomoči pri regulaciji napetosti je zato po naših ocenah samo prehodnega značaja. Ko bodo pametni števeci v veliki večini vgrajeni v omrežje in bo večina SN in NN omrežja pokritega z meritvami in komunikacijskimi napravami, bomo lahko izkoristili te prednosti za izdelavo boljših in učinkovitejših regulacij.



Sl. 1. Primeri statičnih $Q(U)$ karakteristik za razpršene vire [7], [8].

3. IZVEDBA ALGORITMA ZA UČINKOVITO LOKALNO REGULACIJO

V [12] so avtorji obravnavali problematiko optimizacije kondenzatorjev v omrežju. S preklapljanjem kondenzatorjev so dosegli najmanjše izgube in ustrezen napetostni profil, želeli pa so tudi minimizirati število preklapov. Podatki iz merilnih mest so bili poslani v enoten center vodenja, kjer so bile izdelane simulacije omrežja. Optimalna rešitev je določila kateri kondenzatorji naj bodo vklopljeni in kateri ne. Tovrstna ideja je bila dodelana in prenesena na vodenje razpršenih virov v pametnih omrežjih.

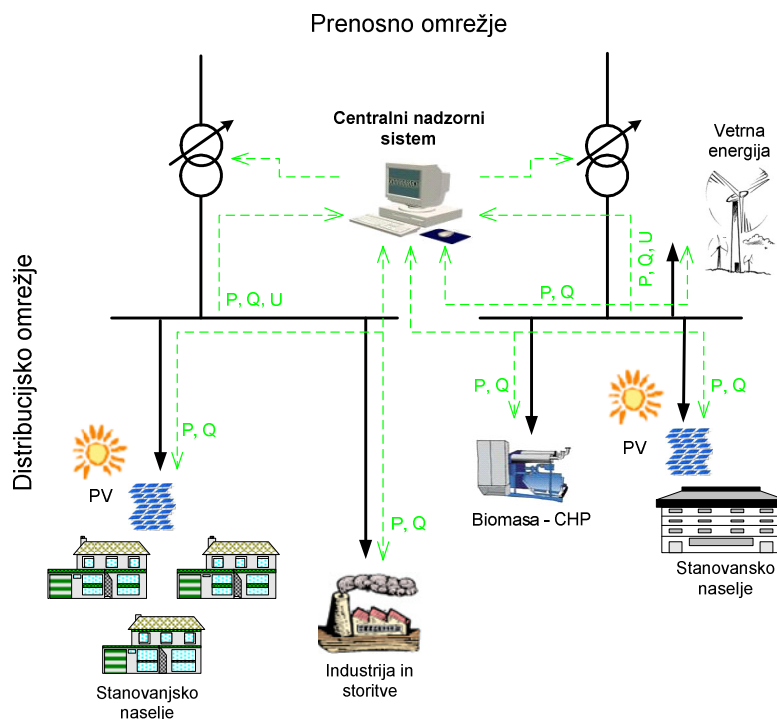
Ker imamo v pametnih omrežjih možnost zajema trenutnih veličin lahko to s pridom izkoristimo za več vrst optimizacij, te so npr:

- vzdrževati napetosti znotraj zakonsko postavljenih meja,
- zmanjšati izgube v omrežju,
- minimizirati investicije v omrežje,
- minimizirati število preklapov regulacijskega transformatorja,
- minimizirati potrebo po proizvodnji jalove energije,
- izboljšati stabilnost,
- olajšati delo operaterju,
- minimizirati stroške za vzdrževanje omrežja in
- izboljšati nadzor omrežja.

Vse to želimo doseči ob predpostavki pravične razdelitve jalove energije med uporabniki. Pravična razdelitev je določena na podlagi razmerja med zahtevano jalovo močjo in proizvodnjo delovne moči, tako moremo določiti enoten $\text{tg}\varphi$ vseh virov vzdolž enega izvoda. Sodelovanje pri sistemskih storitvah je torej sorazmerno proizvedeni delovni moči.

Podatki meritev se zbirajo v centralnem sistemu. Jedro tega algoritma je simulacijsko orodje, ki glede na trenutne vrednosti odjema in proizvodnje, neprestano izvaja simulacije na poenostavljeni shemi omrežja in tako določi optimalno obratovalno točko. Kot optimizacijski pogoj sta bili izbrani dve možnosti, minimalne izgube v omrežju in minimalna proizvodnja

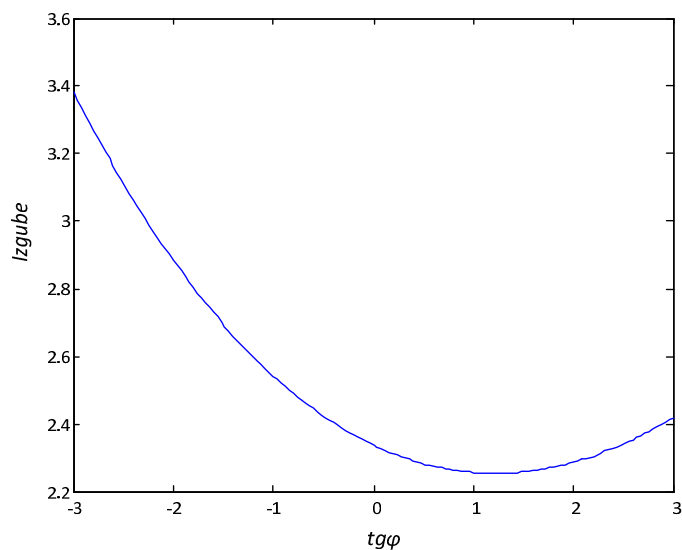
jalove energije iz razpršenih virov. Zavedati se moramo namreč, da obratovanje z manjšim faktorjem moči povzroča hitrejše staranje opreme. Kateri pogoj je bolj pomemben, ni več stvar samega tehničnega področja.



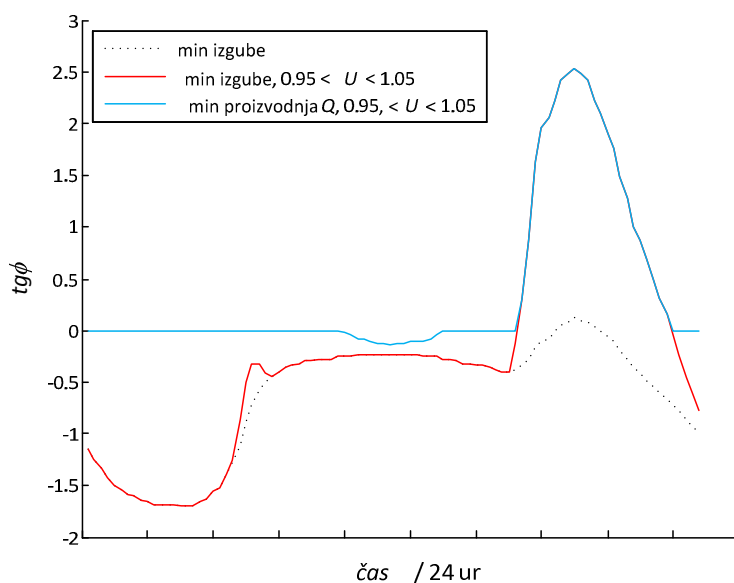
Sl. 2: Primer pametnega omrežja

Slika 3 prikazuje velikost vseh izgub, za določeno stanje odjema na izvodu, v odvisnosti od skupnega $\text{tg}\varphi$. Izvede se nekaj korakov simulacij pretokov moči in tako se določi $\text{tg}\varphi$ pri katerem so izgube najmanjše. Ta vrednost se nato pošlje vsem generatorjem. To seveda še ne pomeni, da bodo res vsi generatorji obratovali s tem $\text{tg}\varphi$ vendar se bodo kar se da približali tej vrednosti.

Slika 4 prikazuje različne možnosti trajektorije $\text{tg}\varphi$ za en dan v primeru relativno velikih nihanj porabe in proizvodnje v omrežju. Rdeča črta prikazuje krivuljo minimalni izgub v omrežju, modra pa minimalno proizvodnjo jalove energije. V določenih trenutkih lahko $\text{tg}\varphi$ zapusti optimalno pozicijo. To se zgodi zato, ker moramo pri izračunu upoštevati tudi napetostne meje. Optimalni $\text{tg}\varphi$ lahko leži v območju, kjer izračunane napetosti niso več v mejah, zato algoritem določi drugo obratovalno točko. Iz slike je razvidno, da se je to zgodilo v času največje aktivnosti sonca, torej ob opoldanski uri, ko so morali viri absorbirati del jalove energije, da so zmanjšali dvig napetosti preko meja. V večernem času, ko pa je bila aktivnost sonca nizka, poraba pa je narasla, so morali viri proizvajati veliko količino jalove energije, da so držali napetostni profil še nad minimalno mejo. Katera obratovalna točka bo poslana generatorjem v omrežju je, kot rečeno, stvar ekonomskega ovrednotenja.



Sl. 3: Prikaz vseh izgub na enem izvodu v odvisnosti od skupnega $\text{tg}\varphi$ generatorjev v času velike porabe in majhne proizvodnje

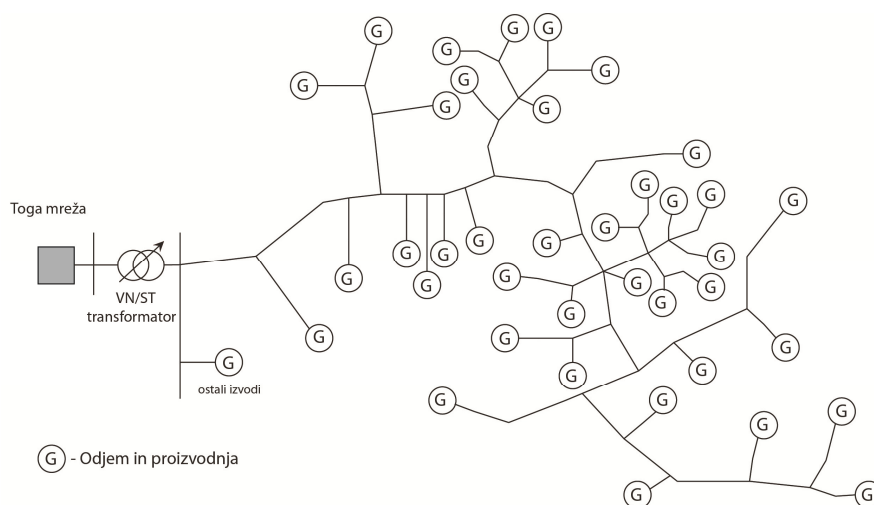


Sl. 4: Izračunani optimalni $\text{tg}\varphi$ vseh razpršenih virov na enem izvodu

Lahko se zgodi, da nekateri generatorji včasih ne morejo slediti zahtevani obratovalni točki oz. da pride do odstopanj ali pa je pogodbeno določen minimalni faktor moči. V takem primeru moramo vedno upoštevati napetostne meje – ta pogoj mora veljati vedno, šele ko je ta izpolnjen, lahko optimiziramo delovanje omrežja z dodatnimi pogoji.

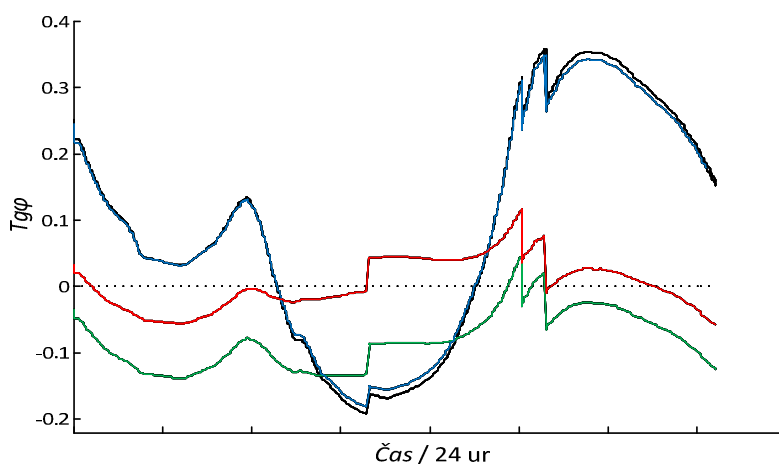
4. SIMULACIJA REGULACIJSKEGA ALGORITMA

Sl. 5 prikazuje en izvod realnega 20 kV distribucijskega omrežja. Za potrebe simulacij sta bila uporabljena programski paket DIgSILENT Power factory in Matpower 4.1, ki je knjižnica za programski paket Matlab in omogoča izračun pretokov moči [13]. V simulacijski izračun za en dan so bili vneseni različni tipični bremenskih diagramov, tako za urbano naselje kot industrijo. Nato je bila dodana še razmeroma velika proizvodnja iz razpršenih virov. Glede na to, da se v Sloveniji pričakuje strmo rast fotonapetostnih elektrarn, je bilo teh dodanih največ.

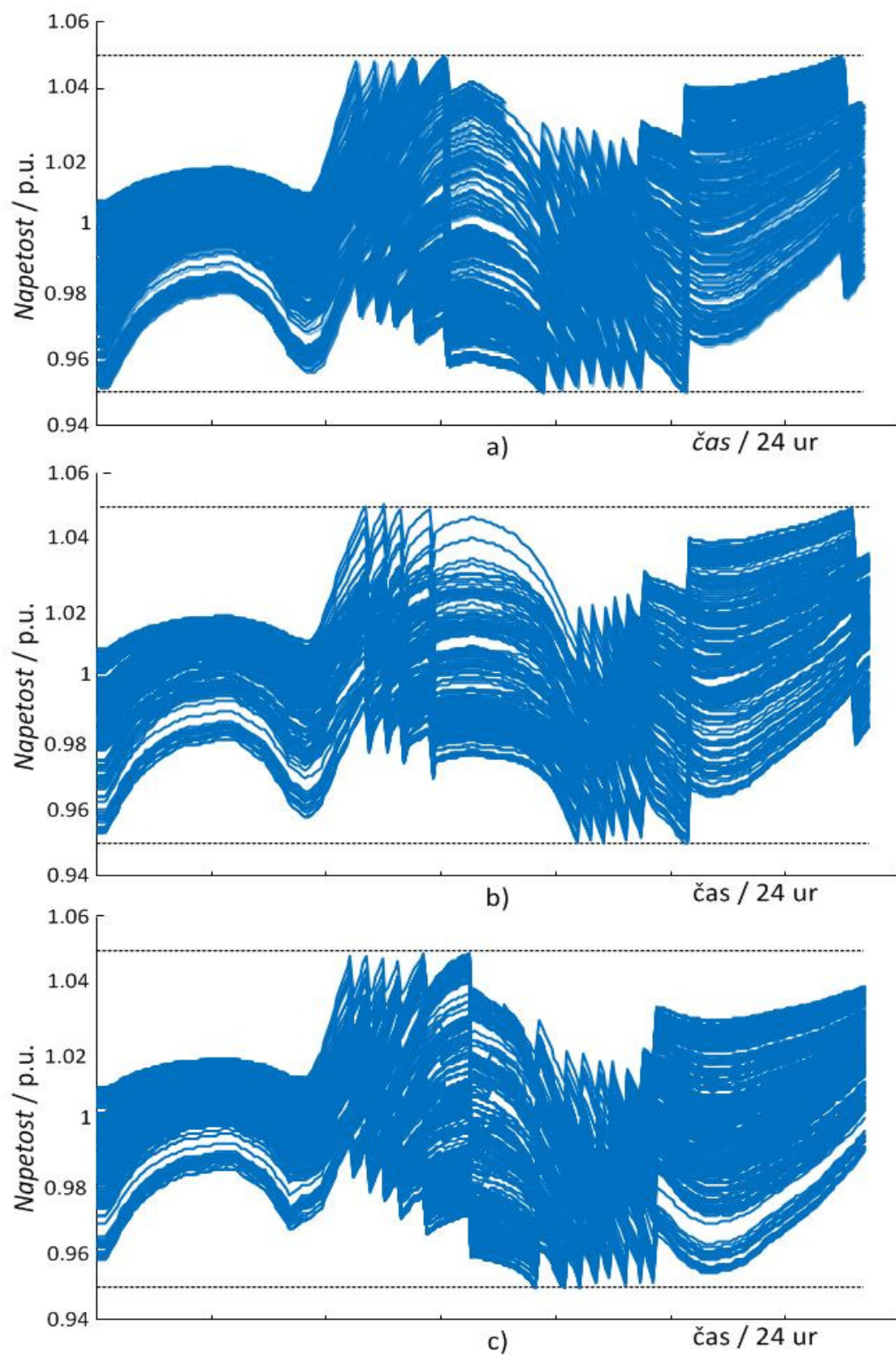


Sl. 5: En izvod realnega distribucijskega omrežja

V nadaljevanju so prikazani rezultati simulacij za različne vrste regulacij. Sl. 7 a) prikazuje napetostni profil, ko RV niso sodelovali pri regulaciji napetosti ($\cos \varphi = 1$). Sl. 7 b) prikazuje napetostni profil, ko so bili RV regulirani po statični $Q(U)$ karakteristiki, predpisani po [7] in sl. 7 c) prikazuje napetostni profil, ko so RV v omrežju sledili točki minimalnih izgub.



Sl. 6: Primer vrednosti $\text{tg} \varphi$ pri uporabi statične karakteristike za štiri generatorje na različnih lokacijah. V primeru regulacije s statično $Q(U)$ karakteristiko so bolj oddaljeni viri bolj obremenjeni kot tisti na začetku izvoda.



Sl. 6: Enodnevni napetostni profil za različne tipe regulacij

4.1 Ocena rezultatov simulacije

Preglednica I: Rezultati simulacije

<i>Regulacija</i>	<i>Št. Preklopov</i>	<i>Izgube / kWh</i>
brez RV	4	872
konstanten $\cos \varphi$	14	565
statična $Q(U)$ karakteristika	12	553 – 578
Minimalne izgube v omrežju	14	492

Iz rezultatov je razvidno, da se z razpršenimi viri v omrežju izgube močno zmanjšajo. Vzrok temu so krajše prenosne poti do odjemalcev. V primeru, ko viri obratujejo s konstantnim $\cos \varphi = 1$, je v omrežju relativno veliko število preklopov regulacijskega transformatorja. Tudi izgube so večje, kot če bi viri vsaj delno kompenzirali pretoke jalove moči. V primeru statičnih $Q(U)$ karakteristik tudi RV sodelujejo pri regulaciji napetosti in s tem omilijo njen porast. Znotraj pasu, ki ga predpisuje [7], so lahko izgube zelo različne, v splošnem pa se povečajo. Poleg tega je potrebno omeniti, da v tem primeru viri na koncu izvoda prispevajo bistveno več k regulaciji sistemskih parametrov.

V primeru časovno odvisnega $\tan \varphi$, ko so bile pogoj minimalne izgube v omrežju, smo le-te zmanjšali za cca. 13 % v primerjavi s statično karakteristiko. Poleg tega je bil prispevek vsakega vira sorazmeren njegovi delovni moči.

Opazno je, da so z uporabo časovno odvisnega faktorja moči predvsem največje koristi za sistemkega operaterja omrežja na račun nižanja stroškov načrtovanja omrežja (zamik investicij v kasnejše obdobje in višja stopnja integracije razpršene proizvodnje).

5. ZAKLJUČEK

Članek obravnava tematiko vključevanja razpršenih virov v distribucijsko omrežje. Ti viri so do nedavnega obratovali s konstantnim faktorjem moči in niso sodelovali pri regulaciji napetosti. To stanje se je izboljšalo z izdajo navodil za priključevanje razpršenih virov, ki predpisujejo statično $Q(U)$ karakteristiko. V prihodnjih pametnih omrežjih in z zmožnostjo dvosmernih podatkovnih povezav, se bo tovrstna regulacija nadgradila in možno bo aktivnejše sodelovanje RV pri regulaciji napetosti.

S časovno odvisnim faktorjem moči se lahko optimizira delovanje omrežja in naprav na več zelenih načinov. Predstavljen je bil koncept optimizacije z minimizacijo izgub v omrežju in z minimalnim faktorjem moči razpršenih virov. Algoritem na podlagi meritev poganja simulacije in neprestano določa optimalno točko obratovanja, ob enem pa zagotavlja pravičnejšo razdelitev jalove energije med generatorji. Iz rezultatov simulacij je razvidno, da distribucijska omrežja skupaj z IKT tehnologijo delujejo bolj fleksibilno in z manjšimi stroški.

6. VIRI, LITERATURA

- [1] K. Turitsyn, P. Šulc, S. Backhaus, M. Chertkov, Options for control of reactive power by distributed photovoltaic generators, *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, No. 6, June 2011.
- [2] C. L. Masters, Voltage rise the big issue when connecting embedded generation to long 11 kV overhead lines, *Power Engineering Journal*, February 2002.
- [3] B. Blažič, T. Pfajfar and I. Papič, Voltage Control in Networks with Distributed Generation – A Case Study, *Sustainable Alternative Energy (SAE)*, September 2009.
- [4] S. Quaia, Present and future limits for the PV generation growth, *Elektrotehnični vestnik* 77(2-3): 95-100, 2010, Ljubljana, Slovenija.
- [5] H. Brunner, A. Lugmaier, B. Bletterie, H. Fechner, R. Bründlinger, DG DemoNetz – Konzept, Wien, Austria, December 2010.
- [6] European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments, *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, European Union, 2011.
- [7] SODO, Navodila za priključevanje in obratovanje elektrarn inštalirane moči do 10 MW, Maribor, Slovenia, Avgust 2010.
- [8] I. Papič, B. Blažič, T. Pfajfar, Koncept aktivnega distribucijskega omrežja, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2010.
- [9] P. Kacejko, S. Adamek and M. Wydra, Optimal Voltage Control in Distribution Networks with Dispersed Generation, *ISGT Europe, 2010 IEEE PES*, October 2010.
- [10] K. H. Zuberi, Master Thesis - Powerline Carrier (PLC) Communication Systems, *Department of Microelectronics and Information Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*, September 2003.
- [11] J. John, China's PLC Smart Grid: Semitech Makes a Beachhead, *Greentechgrid*, December 14, 2011.
- [12] D. T. Chessmore, W-L. Lee, W. E. Muston, T. L. Anthony, F. Daniel and L. Kohrmann, Voltage-Profile Estimation and Control of a Distribution Feeder, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 4, July/August 2009.
- [13] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez and R. J. Thomas, MATPOWER Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, February 2011.

NASLOV AVTORJEV

Marko Kolenc, univ. dipl. inž. el.

Red. prof. dr. Igor Papič, univ. dipl. inž. el.

Doc. dr. Boštjan Blažič, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta, za elektrotehniko

Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

Tel: +386 (0)1 4768 901

Fax: +386 (0)1 4768 289

Elektronska pošta: marko.kolenc@fe.uni-lj.si