

Regulacija napetosti v distribucijskih omrežjih s pomočjo občutljivostnih koeficientov

Karin Erjavec, Igor Papič¹, Boštjan Blažič¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: erjavec.karin@gmail.com

Povzetek. Pomemben cilj energetske politike Evropske unije je tudi večanje deleža obnovljivih virov (OVE) v celotni porabi energije. Pri oskrbi z električno energijo vse bolj narašča delež t. i. razpršenih virov (RV), to je virov manjše moči, ki so priključeni na distribucijsko omrežje. Večanje deleža RV močno vpliva tudi na obratovanje elektroenergetskih omrežij in prinaša nove izzive zlasti pri nadzoru in vodenju distribucijskih omrežij. Ena prvih težav, ki se običajno pojavijo, so težave z zagotavljanjem ustreznega napetostnega profila, ko napetost odstopa od mej, določenih s standardom.

V prispevku je na podlagi simulacij radialnega izvoda distribucijskega omrežja z visokim deležem RV predstavljena problematika regulacije napetosti. Analizirane so tri različne možnosti napredne regulacije napetosti: centralna regulacija napetosti, centralna regulacija napetosti skupaj z regulacijo jalove moči RV s statično karakteristiko in centralna regulacija skupaj z regulacijo jalove moči RV s pomočjo občutljivostnih koeficientov. Simulacije delovanja omrežja z uporabo naštetih metod so izvedene v simulacijskem orodju OpenDSS. Rezultati simulacij prikazujejo učinkovitost pristopov pri regulaciji napetosti, potrebno jalovo moč za izvedbo regulacije in izgube v omrežju. Centralna regulacija skupaj z regulacijo jalove moči RV z matriko občutljivostnih koeficientov se izkaže kot zelo učinkovit način vzdrževanja ustreznega napetostnega profila.

Ključne besede: razpršeni viri, regulacija napetosti, občutljivostni koeficienti, OpenDSS, izgube v omrežju

Sensitivity coefficient based voltage control in distribution networks

The European Union Energy Policy pursues the goal of increasing the share of renewable energy sources (RES) in the final energy consumption. Promoting an increase in the share of RES in distribution networks, also termed distributed generation (DG), affects the operation of these networks. One of the first problems usually emerging with the rising DG share are the inadequate voltage profiles.

Based on simulations of a radial distribution-network feeder with a high DG share, the paper reviews different voltage-control approaches. Three different voltage-control methods are analysed: central voltage control, central voltage control with DG reactive-power control using static characteristics, and central voltage control with DG reactive-power control using sensitivity coefficients. The simulation results show the effectiveness of the compared methods, the required reactive power for voltage control and the associated network losses. Central voltage control with DG reactive-power control using sensitivity coefficients proves to be an effective way of controlling the distribution-network voltage.

Keywords: distributed generation, voltage control, sensitivity coefficients, OpenDSS

1 UVOD

Razpršeni viri (RV) električne energije vplivajo na napetostni profil distribucijskega omrežja in lahko povzročijo odstopanje napetosti od vrednosti, ki jih določa standard SIST EN 50160 [1]. Težave navadno

nastopijo ob veliki proizvodnji in majhni porabi na priključnih mestih z majhno kratkostično močjo, kar povzroči dvig napetosti v omrežju [2].

Klasična regulacija napetosti v distribucijskih omrežjih se izvaja s pomočjo spreminjanja prestavnega razmerja (odcepa navitja) transformatorjev in jo lahko razdelimo na:

- izvajanje avtomatske regulacije napetosti pod obremenitvijo s pomočjo regulacijskega transformatorja v VN/SN razdelilnih transformatorskih postajah (RTP),
- ročno nastavljanje prestave (v breznapetostnem stanju) v SN/NN transformatorskih postajah (TP).

Avtomatska regulacija napetosti navadno spreminja odcep transformatorja glede na napetost na sekundarju transformatorja (meritve napetosti v eni točki), mogoča pa je tudi uporaba kompaundacije, kjer se poleg napetosti upošteva tudi obremenitev (tok) transformatorja. VN/SN transformatorji imajo po navadi 25 regulacijskih stopenj, čas zakasnitve preklopa med posameznimi stopnjami je navadno nastavljen na 2–3 minute, odstopanje merjene napetosti pa je lahko 1 % od zelene vrednosti [3]. Običajne regulacijske stopnje VN/SN transformatorja so podane v tabeli 1.

Težave klasične regulacije pri zagotavljanju ustrezne napetosti lahko nastopijo z večanjem deleža RV v

omrežju, ki z generacijo delovne moči dvigujejo napetost na priključnem mestu. Problem dviga napetosti je mogoče reševati tudi s porabo jalove moči, ki jo lahko zagotovijo nekateri RV [4]–[6]. Veliko fleksibilnost tako omogočajo viri, ki so na omrežje priključeni prek pretvornika, kot so na primer sončne elektrarne. Glavna naloga fotonapetostnih sistemov je proizvodnja delovne moči (kW), sposobnost pretvornika za regulacijo jalove moči pa se lahko uporabi za regulacijo napetosti. Pomemben vidik so pri regulaciji napetosti s pomočjo RV tudi dodatne izgube, ki nastopijo zaradi generirane jalove moči [5].

Tabela 1: Regulacijske stopnje transformatorja VN/SN

Stopnje	Sprememba napetosti
1 ... n ... 12	$+(n \cdot 1,33 \%)$
0	0
- 1 ... n ... - 12	$-(n \cdot 1,33 \%)$

V prispevku bodo s pomočjo simulacij premerjeni in ovrednoteni trije pristopi k regulaciji napetosti: centralna regulacija napetosti, centralna regulacija napetosti skupaj z regulacijo jalove moči RV s statično karakteristiko in centralna regulacija skupaj z regulacijo jalove moči RV s pomočjo občutljivostnih koeficientov. Primerjava bo izvedena na podlagi učinkovitosti pri regulaciji napetosti, jalovi moči, potrebni za izvedbo regulacije in izgub. Cilj regulacije napetosti je omogočiti čim večjo integracijo RV s čim manjšimi vlaganji v omrežje.

2 NAPREDNI PRISTOPI K REGULACIJI NAPETOSTI

V tem poglavju bodo opisani trije napredni načini regulacije napetosti, ki pomenijo nadgradnjo obstoječega koncepta regulacije [2], [5]–[8].

2.1 Centralna regulacija napetosti

Pri centralizirani regulaciji napetosti v distribucijskem omrežju uporabimo obstoječi VN/SN regulacijski transformator, pri čemer merimo napetost v več točkah omrežja. Prestava transformatorja se spremeni, kadar je katera izmed izmerjenih napetosti zunaj želenega območja. S tem pristopom lahko bistveno bolje sledimo razmeram v omrežju, ki jih narekuje proizvodnja RV. Slabost tega pristopa je, da zahteva vgraditev dodatnih merilnih instrumentov in ustrezno komunikacijsko infrastrukturo za prenos merilnih podatkov. V osnovni obliki izvedbe centralne regulacije napetosti RV delujejo s konstantnim faktorjem moči ($\cos\phi=1$) in pri regulaciji ne sodelujejo.

2.2 Centralna regulacija s statično karakteristiko RV

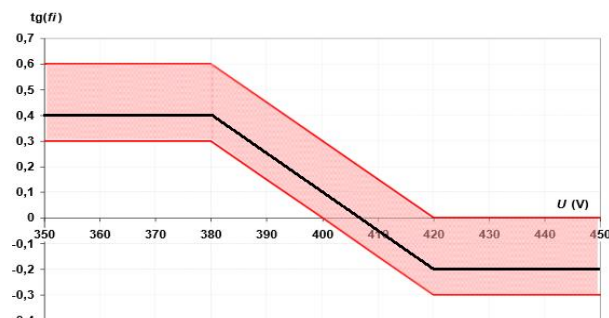
Centralno regulacijo napetosti lahko nadgradimo z regulacijo jalove moči RV s statično karakteristiko

$Q(U)$. Statična karakteristika jalove moči RV, kot jo za majhne RV definira [3], je prikazana na sliki 1 in je podana s pomočjo $\tan\varphi$:

$$-0,5 < \tan\varphi < 0.5. \quad (1)$$

Pri tem je $\tan\varphi$ je razmerje med proizvedeno jalovo in delovno močjo:

$$\tan\varphi = \frac{Q_{RV}}{P_{RV}}. \quad (2)$$



Slika 1: Statična karakteristika jalove moči razpršenih virov

2.3 Regulacija napetosti s pomočjo občutljivostnih koeficientov

V nadaljevanju bo opisana metoda regulacije napetosti s pomočjo RV, ki temelji na analizi napetostnih občutljivostnih koeficientov [7], [8].

Metoda občutljivostnih koeficientov temelji na uporabi Jakobijeve matrike, s katero izrazimo odvisnosti med napetostmi na zbiralkah (efektivna vrednost, kot) in generacijo delovne in jalove moči na zbiralki v omrežju [7]:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta\vartheta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \vartheta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \vartheta} \right] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [1] & [0] \\ [0] & [1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

kjer sta $[\Delta U]$ in $[\Delta\vartheta]$ efektivna vrednost in fazni kot napetosti zaradi injekcij delovne moči $[\Delta P^*]$ in jalove $[\Delta Q^*]$ moči. To enačbo lahko krajše zapišemo kot:

$$\begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta\vartheta] \end{bmatrix} = [s] \begin{bmatrix} [\Delta P^*] \\ [\Delta Q^*] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

kjer je $[s]$ matrika občutljivostnih koeficientov. Regulacija napetosti s strani RV bomo izvajali samo s pomočjo jalove moči, zato enačbo (4) preuredimo v:

$$[\Delta U] = [s_Q][\Delta Q], \quad (5)$$

kjer je $[\Delta U]$ vektor zbiralčnih napetosti, $[\Delta Q]$ vektor sprememb jalove moči in $[s_Q]$ matrika občutljivostnih koeficientov jalove moči [7], ki jo podaja enačba (6).

$$[s_Q] = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_i}{\partial Q_i} & \dots & \frac{\partial U_i}{\partial Q_j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial U_j}{\partial Q_i} & \dots & \frac{\partial U_j}{\partial Q_j} \end{bmatrix} \quad (6)$$

V enačbi (6) indeks pri napetosti U pomeni zbiralko, na kateri želimo regulirati napetost, indeks pri jalovi moči, Q pa zbiralko, kjer je priključen RV, ki omogoča regulacijo jalove moči. Generator, priključen na zbiralko j , ki lahko najbolj pripomore k regulaciji napetosti na zbiralki i , ima maksimalno absolutno vrednost produkta občutljivostnega koeficienta in jalove moči v točki:

$$\frac{\partial U_i}{\partial Q_j} \Delta Q_j. \quad (7)$$

Vse produkte občutljivostnih koeficientov lahko zapišemo v tabeli koeficientov $[T_S]$. Omrežje z N zbiralkami zavzame spodnjo tabelo koeficientov [7]:

$$[T_S] = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial Q_1} \Delta Q_1 & \dots & \frac{\partial U_1}{\partial Q_N} \Delta Q_N \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial U_N}{\partial Q_1} \Delta Q_1 & \dots & \frac{\partial U_N}{\partial Q_N} \Delta Q_N \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Če je na zbiralko j priključen RV, ki ne omogoča regulacije jalove moči, je $\Delta Q_j = 0$, in posledično je tudi element v matriki koeficientov enak nič.

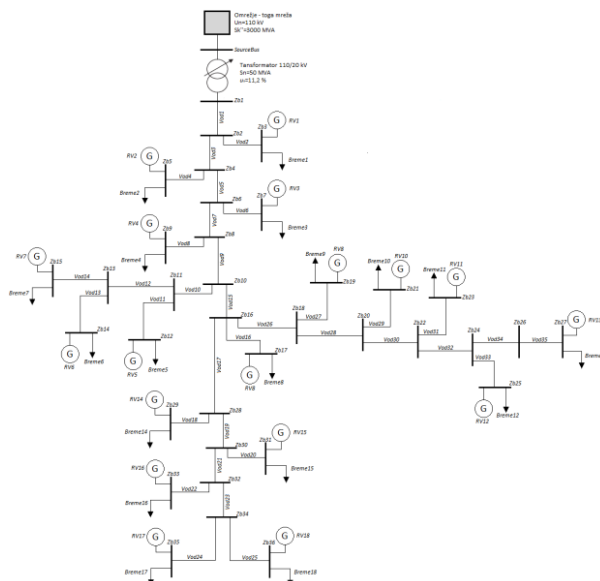
3 OPIS SIMULACIJSKEGA MODELA

Za izvedbo simulacij je bil uporabljen program The Open Distribution System Simulator (OpenDSS) [9] podjetja EPRI (Electric Power Research Institute). Program je namenjen izvedbi analiz na področju distribucijskih omrežij. S pomočjo vmesnika COM (Component Object Model) lahko uporabnik razvije svojo metodo vodenja omrežja in uporablja OpenDSS kot simulacijsko orodje za izračun pretokov moči.

3.1 Opis simuliranega omrežja

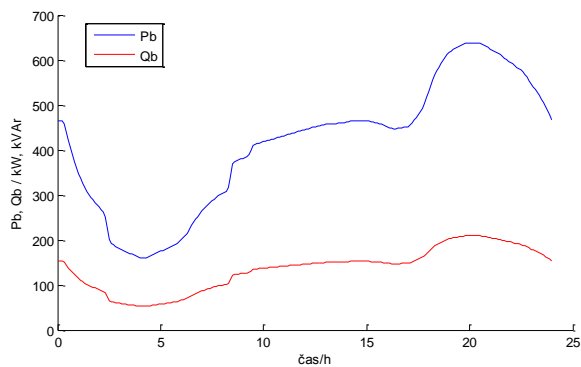
Model simuliranega omrežja je sestavljen iz 110 kV napetostnega vira z znano kratkostično močjo, ki prek transformatorja 110/20 kV moči 50 MVA v RTP-ju napaja 20 kV distribucijsko omrežje. Regulacijski transformator ima 13 stopenj regulacije (- 6, - 5, - 4, - 3, - 2, - 1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6), stopnja regulacije pa je enaka 1,33 % nazivne napetosti. Začetna stopnja regulacijskega transformatorja je pri vseh simulacijah nastavljena na - 4. Na sekundar transformatorja je priključen izvod, ki je sestavljen iz petintridesetih vodov s šestintridesetimi zbiralkami, na osemnajst zbiralk pa je priključeno po eno breme in po en RV. Zbiralka, na katero je priključen primar transformatorja, je poimenovana SourceBus, nato si vse druge zbiralke sledijo po imenih Zb1, Zb2, itn. do Zb36. Vodi so

označeni od Vod1 do Vod35, razpršeni viri (fotonapetostni viri) od RV1 do RV18, bremena (porabniki) pa od Breme 1 do Breme18. Model simuliranega omrežja je prikazan na sliki 2.

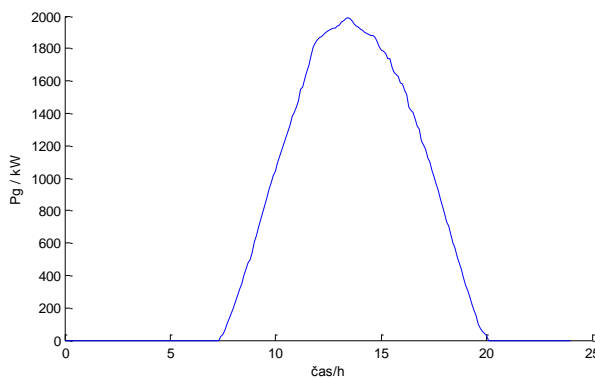


Slika 2: Model simuliranega omrežja

Vsa bremena v omrežju obratujejo s faktorjem delavnosti 0,95, njihov obremenitveni diagram pa prikazuje slika 3. Vsa bremena v omrežju so enaka.



Slika 3: Obremenitveni diagram enega bremena



Slika 4: Diagram proizvodnje energije enega RV skozi dan

Diagram proizvodnje enega RV je prikazan na sliki 4. Vsi RV v omrežju, od RV1 do RV18, so enaki. Obratujejo z različnimi faktorji moči, ki so odvisni od uporabljene metode regulacije in napetosti na priključnem mestu. Maksimalna delovna moč enega RV je enaka 1,99 MW, vseh pa 35,82 MW.

Za vse vode v omrežju predpostavimo, da so enako dolgi, imajo pa različno upornost [R], reaktanco [X] in susceptanco [B]. Električni parametri vodov so prikazani v tabeli 2.

Tabela 2: Lastnosti vodov omrežja

Vod	Začetek voda	Konec voda	R [Ω]	X [Ω]	B [μS]
Vod1	Zbiralka1	Zbiralka2	0,95	0,881	20,0
Vod2	Zbiralka2	Zbiralka3	0,204	0,069	22,62
Vod3	Zbiralka2	Zbiralka4	0,504	0,467	3,478
Vod4	Zbiralka4	Zbiralka5	0,123	0,057	0,424
Vod5	Zbiralka4	Zbiralka6	0,059	0,055	0,41
Vod6	Zbiralka6	Zbiralka7	0,764	0,41	117,1
Vod7	Zbiralka6	Zbiralka8	0,134	0,041	27,71
Vod8	Zbiralka8	Zbiralka9	0,03	0,009	6,267
Vod9	Zbiralka8	Zbiralka10	0,179	0,054	36,95
Vod10	Zbiralka10	Zbiralka11	0,049	0,023	0,17
Vod11	Zbiralka11	Zbiralka12	0,111	0,059	16,96
Vod12	Zbiralka11	Zbiralka13	0,966	0,448	3,331
Vod13	Zbiralka13	Zbiralka14	0,066	0,03	0,226
Vod14	Zbiralka13	Zbiralka15	0,894	0,414	3,082
Vod15	Zbiralka10	Zbiralka16	0,15	0,046	31,01
Vod16	Zbiralka16	Zbiralka17	0,32	0,148	1,103
Vod17	Zbiralka16	Zbiralka28	0,913	0,519	4,325
Vod18	Zbiralka28	Zbiralka29	0,258	0,12	0,891
Vod19	Zbiralka28	Zbiralka30	0,294	0,136	1,014
Vod20	Zbiralka30	Zbiralka31	0,058	0,031	8,922
Vod21	Zbiralka30	Zbiralka32	0,307	0,142	1,058
Vod22	Zbiralka32	Zbiralka33	0,011	0,011	4,901
Vod23	Zbiralka32	Zbiralka34	0,57	0,264	1,965
Vod24	Zbiralka34	Zbiralka35	0,045	0,021	0,156
Vod25	Zbiralka34	Zbiralka36	0,252	0,243	1,81
Vod26	Zbiralka16	Zbiralka18	0,103	0,095	0,707
Vod27	Zbiralka18	Zbiralka19	0,057	0,019	6,283
Vod28	Zbiralka18	Zbiralka20	0,419	0,34	2,686
Vod29	Zbiralka20	Zbiralka21	0,115	0,023	0,17
Vod30	Zbiralka20	Zbiralka22	0,16	0,104	0,916
Vod31	Zbiralka22	Zbiralka23	0,123	0,066	18,85
Vod32	Zbiralka22	Zbiralka24	0,17	0,11	0,975
Vod33	Zbiralka24	Zbiralka25	0,038	0,021	3,151
Vod34	Zbiralka24	Zbiralka26	0,343	0,222	1,965
Vod35	Zbiralka26	Zbiralka27	0,067	0,036	10,242

Simulacija ima 241 točk, ki so v simulacijskem okolju enake 241 sekundam in ponazarjajo en dan. Ena sekunda v simulacijskem okolju torej pomeni približno 6 minut (5,98 minute) v realnem času. Vrednost 0 pomeni čas 0:00:00, vrednost 241 pa 24:00:00. Ob normalnih pogojih mora biti v skladu s priporočili vključevanja RV [3] in glede na standard SIST EN 50160 [1], 95 % 10-minutnih srednjih efektivnih vrednosti napajalne napetosti v SN omrežjih v mejah ± 10 % glede na nazivno napetost. V simulacijah je

definirana zgornja meja odstopanja nazivne napetosti (20 kV) $+5$ % (U_{max}) in spodnja meja -5 % (U_{min}). Z izbiro zgornje meje preprečimo previsoke napetosti, prav tako pa je treba upoštevati možnost najnižjih napetosti, pri čemer je treba zajeti tudi padec na transformatorjih SN/NN in na NN vodih.

V nadaljevanju bomo preverili rezultate različnih metod regulacij napetosti.

4 SIMULACIJE REGULACIJE NAPETOSTI IN PRIMERJAVA REZULTATOV

Obravnavan bo SN izvod, ki je prikazan na sliki 2. S pomočjo simulacij bodo ovrednotene različne možnosti regulacije napetosti regulacijskega transformatorja in RV. Prikazani so naslednji koncepti regulacije:

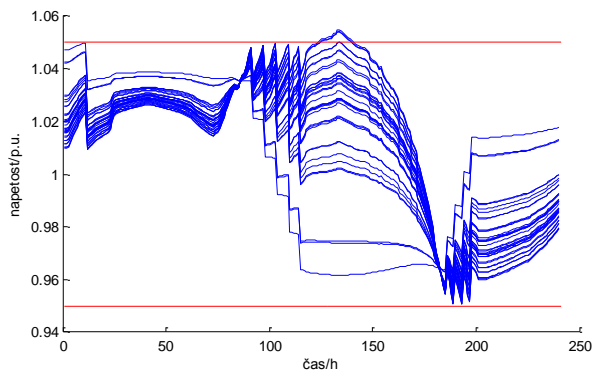
- centralna regulacija,
- centralna regulacija z regulacijo jalove moči s statično karakteristiko,
- centralna regulacija z regulacijo jalove moči s pomočjo občutljivostnih koeficientov.

4.1 Centralna regulacija

Centralno regulacijo izvaja regulacijski transformator v RTP na podlagi meritev napetosti na vseh zbiralkah omrežja. Regulacija v našem primeru poteka tako, da transformator prestavi za prestavo nižje, ko je izmerjena napetost na katerikoli merjeni zbiralki manjša od minimalne dovoljene ($U_{min-izmerjena} < U_{min}$) in ko je hkrati izpolnjen pogoj, da je maksimalna izmerjena napetost v omrežju vsaj za eno regulacijsko stopnjo transformatorja manjša od maksimalne dovoljene, torej ($U_{max-izmerjena} < (U_{max-stopnja})$). Regulacijski transformator prestavi prestavo višje, ko je izmerjena napetost na katerikoli merjeni zbiralki večja od maksimalne dovoljene ($U_{max-izmerjena} > U_{max}$) in ko je hkrati izpolnjen pogoj, da je minimalna izmerjena napetost v omrežju vsaj za eno regulacijsko stopnjo transformatorja večja od minimalne dovoljene, torej ($U_{min-izmerjena} > (U_{min+stopnja})$). Regulacijski transformator torej preklopi šele takrat, ko izmerjena vrednost napetosti na zbiralkah doseže dovoljeno minimalno (0,95 p.u.) oziroma maksimalno (1,05 p.u.) vrednost napetosti.

Na sliki 5 so prikazane napetosti na zbiralkah omrežja za primer centralne regulacije napetosti v omrežju z vključenimi RV. Pri izvajanju regulacije z regulacijskim transformatorjem je treba upoštevati zakasnitve pri spremembi prestave, saj transformator ne more hipno prestaviti. Vrednost je nastavljena tako, da so napetosti v območju 0,95–1,05 p.u., če merjena napetost odstopa minimalno, transformator ne prestavi. Razvidno je, da so vrednosti napetosti v nekaterih merilnih točkah presegle zgornjo vrednost, saj je v obratovalnem času, okrog poldneva, poraba bremen manjša, proizvodnja RV pa velika. Lahko rečemo, da odstopanje ni veliko, pa vendar regulacija napetosti s centralno metodo v prikazanem omrežju ne omogoča

vzdrževanja napetosti znotraj meja. V tem primeru bi vključevanje novih RV le še poslabšalo razmere.



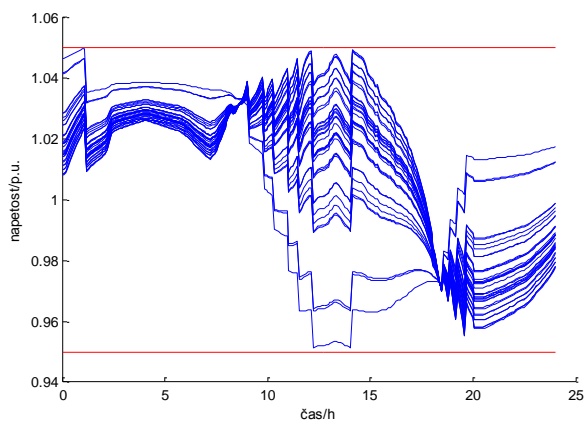
Slika 5: Regulacija napetosti na zbiralkah s centralno metodo regulacije

4.2 Centralna regulacija z regulacijo jalove moči s statično karakteristiko

Druga metoda je nadgradnja prejšnje, kjer se poleg centralne regulacije uporablja še regulacija jalove moči RV s statično karakteristiko. Uporabljena je statična karakteristika $\tan\phi$, ki jo prikazuje slika 1. $\tan\phi$ je za napetosti, izmerjene na zbiralkah, enak:

- $U_{izmerjena} < 0,95$ p.u. $\rightarrow \tan\phi = 0,4$,
- $U_{izmerjena} > 1,05$ p.u. $\rightarrow \tan\phi = -0,2$,
- $0,95$ p.u. $< U_{izmerjena} < 1,05$ p.u. $\rightarrow \tan\phi$ se spreminja linearno s funkcijo $y = 6 \cdot U - 6,1$.

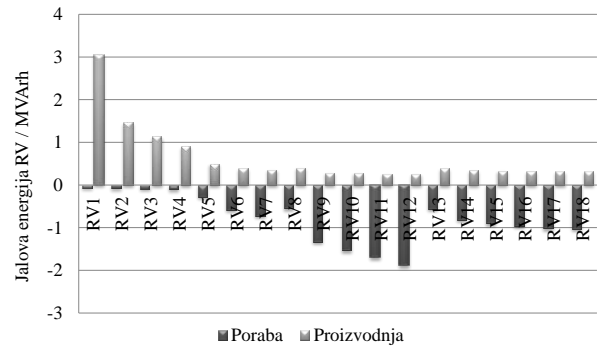
Na sliki 6 so prikazane napetosti na zbiralkah omrežja za primer regulacije s statično karakteristiko. Tokrat je regulacija napetosti uspešna, saj obdrži vse napetosti na zbiralkah omrežja znotraj meja in obenem omogoča nadaljnjo integracijo RV.



Slika 6: Centralna regulacija napetosti z regulacijo jalove moči s statično karakteristiko

Na sliki 7 sta prikazani generacija in poraba jalove energije za posamezen RV v času, ko RV proizvajajo električno energijo. Največ jalove moči proizvede RV1, ki je priključen na zbiralko 2, umeščeno na začetku voda. Največ jalove moči porabi RV12, ki je priključen

na zbiralko 26, ta se nahaja na koncu izvoda. Tudi preostali RV porabljajo in proizvajajo jalovo moč po linearni karakteristiki. Največja poraba nastopi v času, ko napetosti presežejo zgornjo dovoljeno mejo 1,05 p.u. (na zbiralkah na koncu izvoda), največja proizvodnja pa na zbiralkah na začetku izvoda.

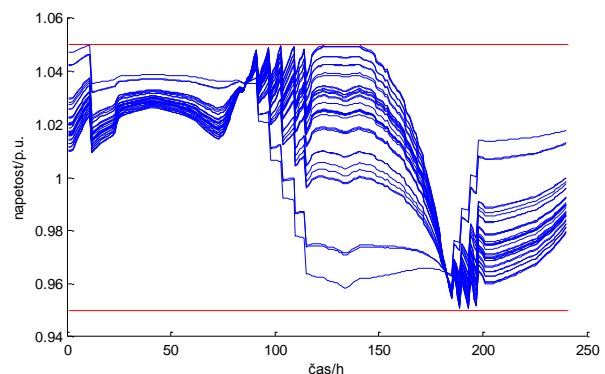


Slika 7: Generacija in poraba jalove energije po posameznih RV v enem dnevu pri regulaciji s statično karakteristiko

4.3 Centralna regulacija z regulacijo jalove moči s pomočjo občutljivostnih koeficientov

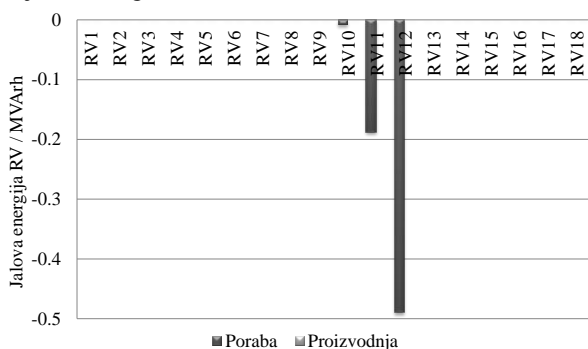
Centralno regulacijo napetosti lahko nadgradimo s pristopom s pomočjo občutljivostnih koeficientov. Z meritvami napetosti na zbiralkah in s pomočjo matrike (8) izberemo RV, ki lahko najučinkoviteje pripomore k izboljšanju napetostnega profila na določeni zbiralki. Ko ta RV ne more več proizvajati oziroma absorbirati jalove moči, se izbere drugi najučinkovitejši RV. Postopek se ponavlja, dokler niso vse napetosti znotraj meja. Kot mejna vrednost za jalovo moč RV je bila izbrana vrednost $\tan\phi$, ki mora biti med $-0,5 < \tan\phi < 0,5$.

Uspešnost vključenosti RV v regulaciji s pomočjo matrike z občutljivostnimi koeficienti prikazuje slika 8. Iz nje je razvidno, da je nadgrajena centralna regulacija z regulacijo jalove moči z matriko občutljivostnih koeficientov uspešna. Napetosti na zbiralkah so v dovoljenih mejah, ki jih prikazuje rdeče obarvana črta, torej 0,95 in 1,05 p.u.



Slika 8: Regulacija napetosti z matriko občutljivostnih koeficientov

Generacija jalove moči posameznega vira je prikazana v diagramu na sliki 9. RV10, RV11 in RV12 absorbirajo jalovo moč, medtem ko preostali RV ne sodelujejo pri regulaciji napetosti. Najučinkovitejši je RV12, ki je priključen na zbiralko 25, in niža napetosti na zbiralki 26. RV, ki ne sodelujejo pri regulaciji napetosti, so manj primerni za absorpcijo oziroma proizvodnjo jalove moči in jih zato algoritem ne izbere.

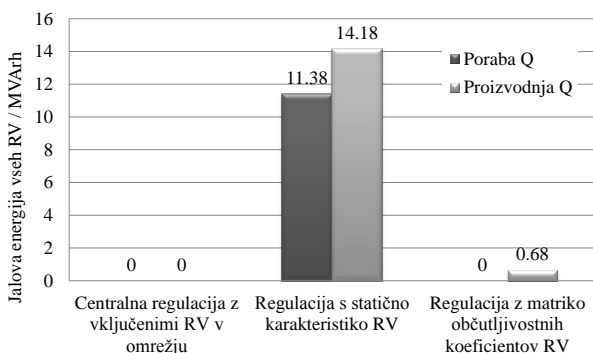


Slika 9: Generacija in poraba jalove energije po posameznih RV pri regulaciji z matriko občutljivostnih koeficientov

Metoda z občutljivostnimi koeficienti se izkaže kot zelo učinkovita. V regulacijo napetosti so namreč vključeni samo tisti RV, ki so najučinkovitejši pri regulaciji napetosti na zbiralki, kjer so bila izmerjena napetostna odstopanja.

4.4 Primerjava metod glede na potrebno jalovo moč za znižanje napetosti

Uporabljene metode regulacije napetosti smo primerjali med sabo glede na količino jalove moči, ki je bila potrebna za uspešno regulacijo. Rezultate prikazuje slika 10. Razvidno je, da pri centralni regulaciji ni ne proizvodnje ne absorpcije jalove moči, saj RV pri regulaciji ne sodelujejo. Centralna regulacija sicer ni mogla zagotoviti ustreznega napetostnega profila. Največ jalove moči je potrebne pri regulaciji s statično karakteristiko zaradi linearnega spreminjanja jalove moči tudi v času, ko so napetosti znotraj meja. Pri regulaciji s pomočjo občutljivostnih koeficientov je potreba po jalovi moči RV pri regulaciji napetosti precej manjša kot pri regulaciji s statično karakteristiko.

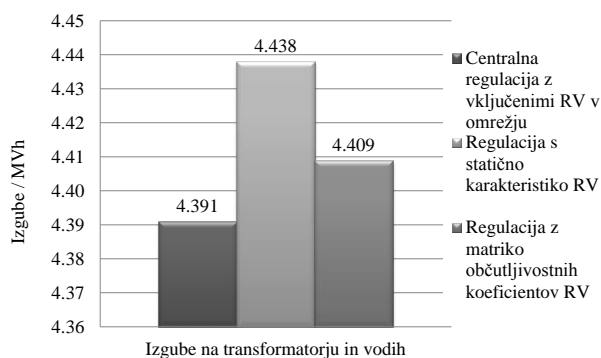


Slika 10: Primerjava metod glede na potrebe jalove moči vseh RV v enem dnevu

4.5 Primerjava metod glede na izgube

Vse uporabljene metode bomo primerjali še glede na izgube na transformatorju in vodih.

Slika 11 prikazuje celotne izgube na transformatorju in vodih v enem dnevu pri obravnavanih regulacijah napetosti. Najmanjše so izgube pri centralni regulaciji, kar je pričakovano glede na to, da v tem primeru ni dodatnih pretokov jalove moči. Pri regulaciji z matriko občutljivostnih koeficientov se izgube nekoliko povečajo (za 0,4 %), najvišje pa so pri regulaciji s statično karakteristiko (1,1 % višje kot pri centralni regulaciji). Povzamemo lahko, da je regulacija z matriko občutljivostnih koeficientov najprimernejša za nadgraditev centralne regulacije napetosti, saj omogoča vzdrževanje napetostnega profila ob majhnem povečanju izgub.



Slika 11: Primerjava metod glede na izgube na transformatorju in vodih omrežja v enem dnevu

5 SKLEP

Ohranjanje omrežne napetosti v predpisanih mejah je eden najpogostejših izzivov v distribucijskih omrežjih z velikim deležem razpršenih virov. V distribucijskih omrežjih se namreč dogaja, da obstoječi koncepti regulacije napetosti ne omogočajo več vzdrževanja ustreznih napetostnih profilov v celotnem omrežju. V prispevku so bili s pomočjo simulacij primerjani in ovrednoteni trije napredni algoritmi regulacije napetosti, ki pomenijo nadgradnjo obstoječega sistema: centralna regulacija napetosti, centralna regulacija napetosti skupaj z regulacijo jalove moči RV s statično karakteristiko in centralna regulacija skupaj z regulacijo jalove moči RV s pomočjo občutljivostnih koeficientov. Rezultati so pokazali, da je centralna regulacija sicer do neke mere učinkovita, ob nadaljnjem večanju deleža RV pa lahko ustrezne napetostni profil zagotavljamo s sodelovanjem RV prek regulacije jalove moči. Pri tem se je kot zelo učinkovita izkazala metoda s pomočjo občutljivostnih koeficientov, ki omogoča izbiro RV z največjim učinkom na napetost na problematični zbiralki, s čimer dosežemo znižanje napetosti z relativno majhno porabo jalove moči in z majhnim povečanjem izgub.

LITERATURA

- [1] Slovenski standard SIST EN 50160:2011: "Značilnosti napetosti v javnih distribucijskih omrežjih", 2011.
- [2] I. Papič, B. Blažič, T. Pfajfar, "Koncept aktivnega razdelilnega omrežja", študija, *Fakulteta za elektrotehniko*, 2008.
- [3] "Navodila za priključevanje in obratovanje elektrarn inštalirane električne moči do 10 MW (Priloga 5)", *Uradni list Republike Slovenije*, 2011, št. 41, str. 5491.
- [4] M. J. Reno, R. J. Broderick, S. Grijalva, "Smart Inverter Capabilities for Mitigating Over-Voltage on Distribution Systems with High Penetrations of PV", *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, str. 3153–3158, 2013.
- [5] B. Uljanič, "Regulacija napetosti v distribucijskih omrežjih s pomočjo razpršenih virov električne energije", diplomsko delo, *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko*, Ljubljana, 2009.
- [6] P. N. Vovos, A. E. Kiprakis, A. R. Wallace, G. P. Harrison, "Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22 Issue 1, str. 476–483, IEEE, 2007.
- [7] M. Brenna, E. De Berardinis, F. Foiadelli, G. Sapienza, D. Zaninelli, "Voltage Control in Smart Grids: An Approach Based on Sensitivity Theory", *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, Vol. 2 No. 8, 2010, str. 467–474, 2010.
- [8] R. Aghatehrani, A. Golnas, "Reactive Power Control of Photovoltaic Systems Based on the Voltage Sensitivity Analysis", *Power and Energy Society General Meeting*, str. 1–5, IEEE, 2012.
- [9] R. C. Dugan, "Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)", *Electric Power Research Institute*, Palo Alto, California, 2013.

Karin Erjavec je diplomirala marca 2014 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Pod okriljem Laboratorija za električna omrežja in naprave je izdelala diplomsko delo z naslovom *Regulacija napetosti v distribucijskih omrežjih s pomočjo občutljivostnih koeficientov*.

Igor Papič je diplomiral leta 1992, magistriral leta 1995 in doktoriral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je zaposlen kot redni profesor. Od leta 1994 do 1996. je bil na izpopolnjevanju pri Siemensovem oddelku za prenos in razdelitev električne energije v Erlangnu v Nemčiji. V letu 2001 je bil gostujoči profesor na University of Manitoba v Winnipegu (Kanada). Njegova raziskovalna dejavnost vključuje aktivne kompenzatorje, naprave FACTS in kakovost električne energije.

Boštjan Blažič je diplomiral leta 2000, magistriral leta 2003 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je od leta 2007 zaposlen kot asistent, od leta 2014 pa je izredni profesor. Poleg poučevanja njegovo delo zajema še raziskave na področju pametnih omrežij in sodobnih kompenzacijskih naprav.