

Analiza vpliva razpršenih virov električne energije na distribucijsko omrežje Zgornje Savinjske doline

DAMJAN HRASTNIK

Povzetek V sodobnih sistemih vodenja distribucijskih omrežij je ena izmed glavnih funkcij izračun pretokov energije. V tem članku je izračun pretokov energije po eni izmed obstoječih metod uporabljen v kombinaciji z optimizacijskim algoritmom na realnem primeru distribucijskega omrežja Zgornje Savinjske doline, natančneje na daljnovodih Rastke in Logarska dolina. Ovrednoten je vpliv električne energije, proizvedene iz razpršenih virov, na obravnavano omrežje. S postopkom optimizacije so določene referenčne vrednosti za generacijo delovne in jalove moči razpršenih virov, ki so priključeni na nizkonapetostni strani transformatorskih postaj. Pri tem je analiziran vpliv generacije delovne in jalove moči na profil napetosti ter na izgube v obravnavanem srednjenapetostnem omrežju.

Ključne besede: • analiza • razpršeni vir • distribucijsko omrežje • pretok energije • zgornja Savinjska dolina •

NASLOV AVTORJA: Damjan Hrastnik, Elektro Celje, d.d., Vrnčeva 2a, 3000 Celje, Slovenija, e-pošta: damjan.hrastnik@elektro-celje.si.

<https://doi.org/10.18690/978-961-286-071-4.21>

ISBN 978-961-286-071-4

© 2017 Univerzitetna založba Univerze v Mariboru

Dostopno na: <http://press.um.si>.

Analysis of the Impact of Distributed Power Generation on Distribution Network in Upper Savinjska Dolina

DAMJAN HRASTNIK

Abstract The load flow calculation is one of the main functionalities incorporated in modern distribution network management systems. In this article, an already known load flow calculation method, combined with an optimization procedure, is applied and tested in the case of real distribution network in Zgornja Savinjska dolina (upper part of valley Savinjska dolina), more precisely on distribution lines Rastke and Logarska dolina. The impact of electrical energy produced in distributed generation units on discussed distribution network is evaluated. The optimization procedure is applied to determine the reference values for active and reactive power generation in distributed generation units connected to the low voltage side of distribution transformers, where the impact of generated active and reactive power on voltage profile and distribution network losses in medium voltage network is analyzed.

Keywords: • analysis • distributer power generation • distribution network • load flow • upper Savinjska dolina •

CORRESPONDENCE ADDRESS: Damjan Hrastnik, Elektro Celje, d.d., Vrunčeva 2a, 3000 Celje, Slovenia,
e-pošta: damjan.hrastnik@elektro-celje.si.

<https://doi.org/10.18690/978-961-286-071-4.21>

ISBN 978-961-286-071-4

© 2017 University of Maribor Press

Available at: <http://press.um.si>.

1 Uvod

Distribucijsko omrežje električne energije je eden izmed ključnih členov v verigi oskrbe z električno energijo in predstavlja del večje celote, ki jo imenujemo elektroenergetski sistem. Povezuje prenosno omrežje s končnimi odjemalci električne energije. V obdobju zadnjih nekaj let se je predvsem zaradi ugodne subvencije s strani Republike Slovenije ter evropske direktive po povečanju proizvodnje električne energije iz razpršenih virov delež le-teh močno povečal. Distribucijska omrežja, ki jih poznamo iz zgodovine, so zasnovana na način, da pretoki energije s sponk distribucijskega energetskega transformatorja le-to pripeljejo do končnih odjemalcev. S povečevanjem števila razpršenih virov prihaja do spreminjanj smeri pretokov električne energije. Iz tega sledi, da napetostni profili in pretoki energije niso definirani samo z bremenom, ampak tudi z vplivi razpršenih virov. Pametna vključitev razpršenih virov v omrežje prinaša veliko prednosti [2]. Glavni problem obratovanja distribucijskih omrežij, v katera so priključeni razpršeni viri, predstavlja doseganje ustreznega profila napetosti ter obvladovanje izgub. S porastom deleža razpršenih virov se tako spreminjajo tudi osnovne obratovalne lastnosti distribucijskih omrežij.

Trenutno proizvodnjo električne energije iz razpršenih virov je zelo težko uskladiti z lokalno porabo, zato se predvsem v primerih, kjer je delež razpršenih virov visok, pojavljajo viški električne energije. Ti se pretakajo vzdolž srednjenapetostnih vodov v smeri proti razdelilnim transformatorskim postajam oziroma razdelilnim postajam. Tako se klasični padajoči napetostni profil od razdelilnih transformatorskih postaj v smeri odjema, ki je značilen za vode, kjer razpršena proizvodnja ne nastopa, bistveno spremeni. Pojavljati se pričnejo lokalni odseki srednjenapetostnih vodov, kjer lahko napetosti prekoračijo dopustne vrednosti, napetost pa je lahko celo višja na koncu voda kot na njegovem začetku. Tem spremembam je bilo potrebno ustrezno prilagoditi sodobne sisteme nadzora in vodenja distribucijskega omrežja.

V članku bo obravnavan praktični primer obratovanja dveh radialnih srednjenapetostnih distribucijskih vodov na področju Zgornje Savinjske doline v dejanskih razmerah. Konkretno bosta obravnavana 20 kV daljnovod Rastke in 20 kV daljnovod Logarska Dolina, priključena v razdelilno postajo Ljubno. Zaradi znatnega deleža priključenih razpršenih virov, ki vključujejo elektrarne vodnega potenciala oziroma male hidroelektrarne (MHE) ter elektrarne sončnega potenciala oziroma male fotovoltaične elektrarne (MFE), občasno nastopajo težave z napetostnim profilom, tako lokalno na nivoju transformatorskih postaj, na srednjenapetostnih vodih, kot tudi v razdelilni postaji Ljubno.

Izhodiščno podlago za opredelitev problemov z napetostnim profilom bo predstavljala analiza merilnih rezultatov iz obstoječih merilnih sistemov AMI (Automated Metering Infrastructure oz. napredne merilne infrastrukture), nameščenih v transformatorskih postajah, in sicer na nizkonapetostni strani SN/NN transformatorjev. Na osnovi podatkov o parametrih in topologiji obravnavanega omrežja, ki jih vsebujeta programsko orodje DMS in geografski informacijski sistem (GIS), je izdelan simulacijski model v programskem orodju DMS in programskem paketu Matlab.

Na osnovi modela omrežja bodo analizirane razmere za najbolj kritičen čas v dnevu, ko je vpliv proizvodnje in vpliv razpršenih virov največji, obenem pa je največja tudi poraba električne energije oziroma obremenitev omrežja. Razpršeni viri električne energije so modelirani kot bremena z negativnim predznakom in z možnostjo spreminjanja faktorja moči. Na ta način so z izdelanim modelom ovrednoteni pretoki energije ter njihov vpliv na napetostni profil in

izgube pri distribuciji električne energije. Referenčne vrednosti delovne in jalove moči bodo določene ob upoštevanju znane proizvodnje električne energije iz razpršenih virov ter obremenitve omrežja, ki so bile pridobljene iz sistemov AMI. Na opisan način določene referenčne vrednosti delovne in jalove moči bodo zagotovile ustreznost napetostnega profila v obravnavanem obratovalnem stanju, ne da bi bila pri tem omejena oziroma reducirana generirana delovna moč razpršenih virov. Obratovalno stanje je določeno na osnovi izračuna pretokov energije, referenčne vrednosti sprememb delovne in jalove moči razpršenih virov pa na osnovi optimizacijskega iskalnega postopka diferenčne evolucije. Cilj je ovrednotenje učinkov generacije delovne in jalove moči razpršenih virov na izbrano distribucijsko omrežje, natančneje, na napetostni profil omrežja in izgube.

2 Elektro Celje, Zgornja Savinjska dolina in razdelilna postaja Ljubno

Na podlagi pogodbe o najemu elektrodistribucijske infrastrukture in izvajanju storitev za operaterja distribucijskega sistema električne energije, družbe SODO, d. o. o., izvaja distribucijsko dejavnost v Sloveniji naslednjih 5 elektrodistribucijskih podjetij [1].



Slika 21.1: Elektrodistribucijska podjetja v Sloveniji

Distribucijsko območje Elektra Celje obsega tri osrednjeslovenske regije; Savinjsko, Koroško in Spodnjeposavsko. V omenjene regije spada skupaj 40 občin v celoti ter dve delno. Velikost distribucijskega območja znaša 4.345 km², kar predstavlja približno 22 % površine Slovenije, s 383.000 prebivalci in približno 169.000 odjemalci. Stanje elektroenergetskih opreme in vodov z dne 31. 12. 2014 je prikazano v tabeli 21.1.

2.1 Zgornja Savinjska dolina

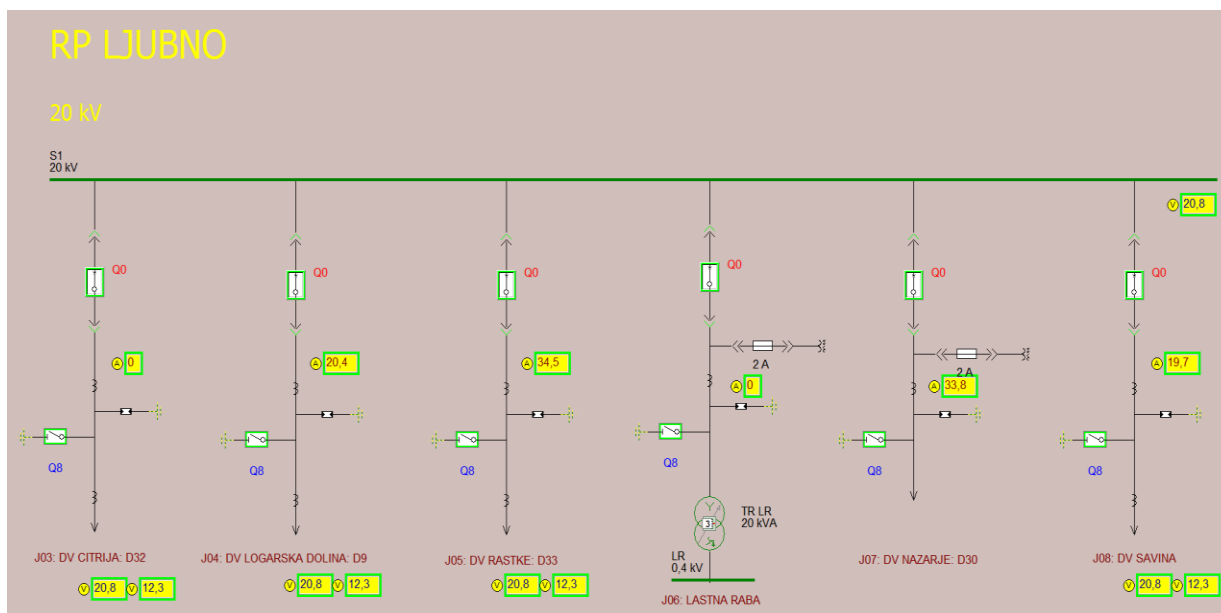
Zgornja Savinjska dolina je dolina v porečju zgornjega toka reke Savinje s tipično alpsko pokrajino. V povirju Savinje na Solčavskem obsega Kamniško-Savinjske Alpe z alpskimi dolinami Matkov kot, Robanov kot, Logarsko dolino ter del Karavank z Olševo. Med visokimi alpskimi kraškimi planotami Golte, Menina planina in Dobrovlje sta vglobljeni gornjegrajska in mozirska kotlina. Na koncu mozirske kotline se dolina Savinje zoži pri Soteski (naselje pri Ljubiji) ter se zatem razširi in preide v Spodnjo Savinjsko dolino. Teritorialno obsega površino 507 km², število prebivalcev je približno 16.500. Lokalne skupnosti oziroma občine so Mozirje,

Nazarje, Rečica ob Savinji, Gornji Grad, Ljubno, Luče, Solčava [4]. Kot je značilno za alpske pokrajine, tudi skozi to dolino teče reka s svojimi številnimi pritoki. Na teh je bilo predvsem v preteklosti zgrajenih in v distribucijsko omrežje priključenih večje število razpršenih virov vodnega potenciala oziroma tako imenovanih malih hidroelektrarn (MHE). Kot velja za večino alpskih rek s pritoki, le-te vodni potencial izrabljajo praktično skozi celo leto.

V obdobju zadnjih nekaj let se je predvsem zaradi ugodnih subvencij s strani Republike Slovenije ter evropske direktive o energetske učinkovitosti povečeval delež proizvodnje električne energije iz razpršenih virov. Tudi na področju Zgornje Savinjske doline se je precej povečal predvsem delež MFE. Ne glede na omenjeno glavni del proizvodnje električne energije iz razpršenih virov še vedno predstavljajo MHE, razmerje med MHE in MFE je približno 9 : 1 v korist MHE.

2.2 Razdelilna postaja Ljubno

Razdelilna postaja Ljubno je, kot že samo ime pove, razdelilna postaja, katere funkcija je razdeljevanje električne energije, ki priteče po dovodnem daljnovodu in se razdeli med srednjenapetostne izvode. Napajana je preko dvosistemskega daljnovoda 2x20 kV iz razdelilne postaje Nazarje, ta pa iz razdelilne transformatorske postaje 110/20 kV Mozirje. V razdelilni postaji Ljubno sta priključena dva dovodna daljnovoda, natančneje povezovalni in napajalni. Povezovalni vod J07: DV Nazarje je namenjen čistemu napajanju razdelilne postaje Ljubno, drugi tako imenovani povezovalni vod J08: DV Savina, je kosmasti vod, ki v normalnem obratovalnem stanju ne napaja te razdelilne postaje in je namenjen rezervnemu napajanju. Slika 21.2 prikazuje enočrtno shemo razdelilne postaje Ljubno z dejanskim stanjem meritev v trenutku zajema slike.



Slika.21.2 : Enočrtna shema razdelilne postaje Ljubno

Razdelilna postaja oziroma objekt je v osnovi sestavljen iz 6 srednjenapetostnih celic, od katerih je ena napajalna celica (J07: DV Nazarje), ena celica lastne rabe (J06: Lastna raba), ostale štiri celice (J03: DV Citrija, J04: DV Logarska Dolina, J05: DV Rastke in J08: DV Savina) so klasične srednjenapetostne izvodne celice.

Postaja je bila zgrajena leta 1998 in z vzdrževalnimi deli obnovljena leta 2015. Število transformatorskih postaj SN/NN, ki so iz objekta napajani v normalnem obratovalnem stanju, je 108, število vseh napajanih odjemalcev pa 1682. Skupna dolžina vseh srednjenapetostnih vodov iz razdelilne postaje Ljubno znaša 102,21 km. Daljnovoda, ki sta modelirana in podrobneje analizirana, sta daljnovod Rastke in daljnovod Logarska dolina, na katera je priključen večinski del razpršenih virov v obliki MHE in MFE.

Daljnovod Rastke napaja 16 SN/NN transformatorskih postaj in je večinoma zračne izvedbe. Skupna dolžina izvoda je 17,23 km. Na izvod je priključenih 11 proizvodnih enot (elektrarn), ki so tipa MHE in MFE. Njihova instalirana moč znaša 2,8 MW.

Daljnovod Logarska Dolina napaja 66 SN/NN transformatorskih postaj in je enako kot daljnovod Rastke večinoma zračne izvedbe. Skupna dolžina izvoda je 72,53 km in predstavlja najdaljši radialni vod v celotnem distribucijskem omrežju Elektra Celje, d. d.. Na izvod je priključenih 37 proizvodnih enot (elektrarn) v obliki MHE in MFE. Njihova instalirana moč znaša 2,2 MW.

Skupna priključena moč razpršenih virov v razdelilni postaji Ljubno znaša približno 5 MW. Večinski del predstavljajo MHE, medtem ko je delež MFE v primerjavi z MHE znatno manjši in znaša približno 450 kW. Iz tega sledi, da je razmerje moči razpršenih virov MHE in MFE približno 9 : 1. V primeru velike proizvodnje električne energije iz razpršenih virov obeh tipov (ugodne hidrološke razmere, visoko osončenje) se občasno pojavijo težave z napetostnim profilom. Te se pojavijo na samih zbiralkah razdelilne postaje Ljubno, na srednjenapetostnih izvodih ter lokalno, torej na nivoju transformatorskih postaj. Razpršeni viri delujejo povsem avtonomno, nepovezano in neodvisno eden od drugega.

V večini primerov se za kompenzacijo uporablja fiksna kompenzacija faktorja moči s klasičnimi kondenzatorskimi baterijami, kar še dodatno slabša razmere pri obvladovanju napetostnega profila.

3 Podatki in modeliranje omrežja

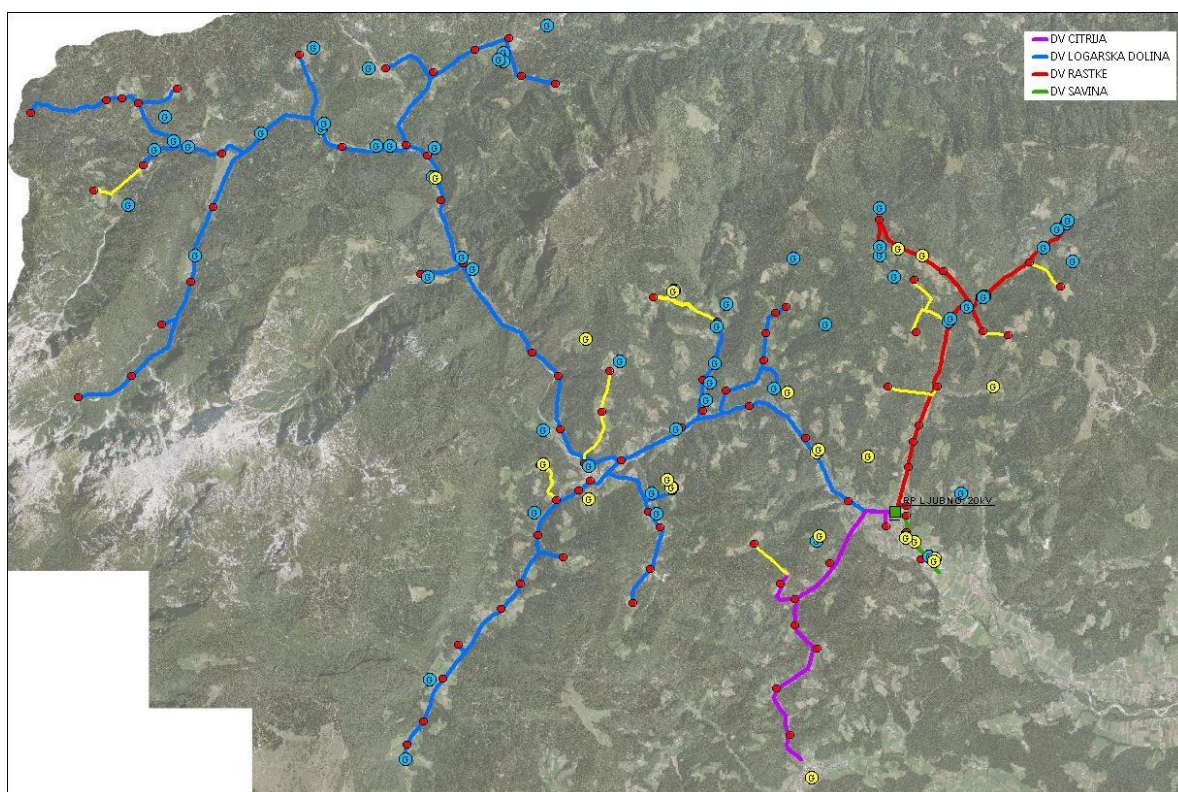
Za analizo pretokov energije je potrebno natančno poznati posamezne elemente omrežja, ki so predstavljeni z ustreznimi matematičnimi modeli. Modeliranje elementov omrežja predstavlja bistveni del analize, točnost rezultatov izračuna pretokov energije pa zavisi predvsem od dobrega in natančnega modela omrežja ter podatkov.

V normalnih obratovalnih stanjih predpostavimo, da imamo opravka z uravnoveženim, trifaznim sistemom. V uravnoveženem trifaznem sistemu so vse tri gonilne napetosti simetrične, zaradi simetrične obremenitve pa tvorijo tudi toki faznih porabnikov in toki skozi elemente sistema simetričen sistem. V primeru trifaznega simetričnega sistema lahko vode, bremena in razpršene vire modeliramo samo enofazno, za preostali dve fazi pa predpostavimo enake razmere [5].

V članku uporabljeni tako imenovani statični del podatkov elektroenergetska omrežja je pridobljen iz GIS-a, praktični primer prikazuje slika 21.3.

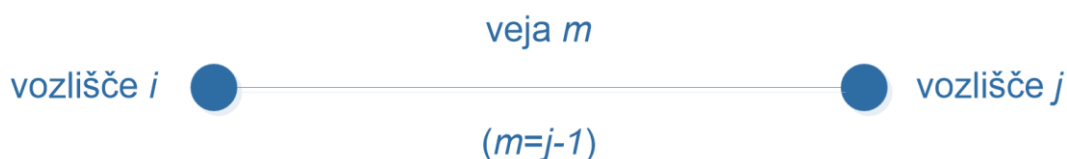
Na njej so z različnimi barvami označeni vsi objekti, srednjenapetostni vodi in razpršeni viri, napajani iz razdelilne postaje Ljubno, in sicer:

- rdeča barva označuje daljnovod Rastke,
- temno modra barva označuje daljnovod Logarska dolina,
- vijolična barva označuje daljnovod Citrija,
- zelena barva označuje daljnovod Savina,
- krogi v rdeči barvi označujejo transformatorske postaje SN/NN,
- krogi v svetlo modri barvi označujejo razpršene vire tipa MHE,
- krogi v rumeni barvi označujejo razpršene vire tipa MFE.



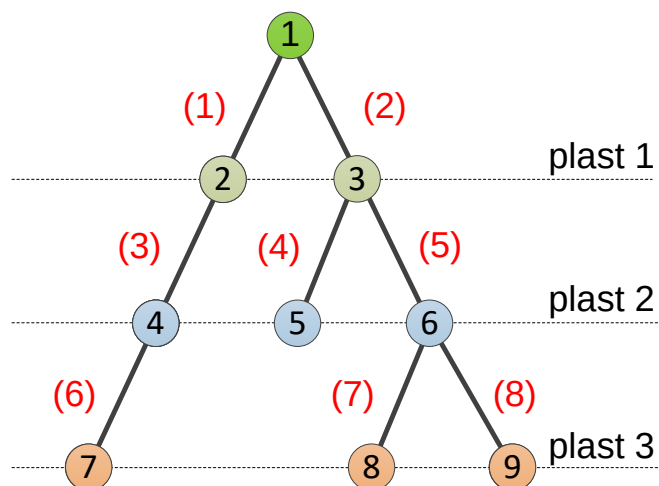
Slika 21.3: Shematični prikaz distribucijskega omrežja na področju Zgornje Savinjske doline

Podatki so se v osnovi nahajali v shape datotekah, ki so vsebovale vse potrebne atributne podatke. Te shape datoteke so bile nato uvožene v programsko orodje QGIS, z namenom nadaljnje predpriprave podatkov za ustrezen način številčenja vozlišč ter vej. Ustrezno številčenje vej in vozlišč uporabljenega modela omrežja zagotovi izkoriščanje radialne topologije omrežja, kakršna je uporabljena za primera daljnovoda Rastke in daljnovoda Logarska dolina. Veja (m), omejena z začetnim oziroma oddajnim vozliščem (i) ter končnim oziroma sprejemnim vozliščem (j), je oštevilčena le z eno številko. Veja (m) je vedno za ena manjša od številke končnega vozlišča (j), kar prikazuje slika 21.4. [6]



Slika.21.4: Enočrtni prikaz voda z vejami in vozlišči

V nadaljevanju sledi razdelitev vozlišč na plasti, natančneje se vozlišča razdeli glede na oddaljenost od bilančnega vozlišča. Z najmanjšo oziroma najnižjo številko oštevilčimo bilančno vozlišče, kar predstavljajo srednjenapetostne zbiralke razdelilne postaje Ljubno. Številčenje poteka na način, da se posameznim vozliščem plasti 1 dodeljujejo številke zaporedno od 2 naprej, dokler vsa vozlišča v 1. plasti niso oštevilčena. Nato nadaljujemo z oštevilčenjem vozlišč v naslednji, 2. plasti in tako naprej oziroma do točke, dokler ni oštevilčeno vsako posamezno vozlišče (slika 21.5). Na kratko povzeto, vozlišča, ki so direktno povezana z bilančnim vozliščem, predstavljajo vozlišča prve plasti, vozlišča, ki so direktno povezana z vozlišči 1. plasti, predstavljajo vozlišča 2. plasti itn.



Slika 21.5: Oštevilčevanje vej in vozlišč

Nadalje sledi definiranje dveh vektorjev. Začetno vozlišče oziroma oddajno vozlišče (v_z) je vozlišče, ki predstavlja začetek posamezne veje in je vedno bližje bilančnemu vozlišču glede na končno vozlišče. Končno vozlišče oziroma sprejemno vozlišče (v_k) je vozlišče, ki predstavlja konec posamezne veje in ima vedno za ena večjo številko od veje, ki jo končuje.

Na osnovi definicije v_z in v_k ter predhodno opisanega številčenja vej je definirana tabela povezav 21.1, ki opisuje primer omrežja na sliki 21.5.

Tabela 21.1: Tabela povezav vej in vozlišč

Veja m	1	2	3	4	5	6	7	8
Začetno (oddajno) vozlišče v_z	1	1	2	3	3	4	6	6
Končno (sprejemno) vozlišče v_k	2	3	4	5	6	7	8	9

V vozlišča so priključena bremena in razpršeni viri, iz posameznega vozlišča pa lahko izhaja več vej, v vsakem od njih je potrebno določiti štiri parametre. Prva dva parametra, fazna efektivna vrednost napetosti U in kot napetosti δ , predstavljata napetostne razmere vozlišča. Preostala dva parametra sta povezana s pretokom energije skozi vozlišča, predstavljena sta z delovno močjo P in jalovo močjo Q . Od štirih parametrov vozlišč sta v vsakem posameznem vozlišču poznana zgolj dva. To pomeni, da smeta biti v nekem vozlišču omrežja le dva parametra neznana, preostala dva morata biti vedno podana, poznavanje parametrov pa zavisi od tipa vozlišča.

Razpršene vire je pri izračunu pretokov energije potrebno predhodno modelirati. V osnovi jih lahko pri izračunu predstavimo kot vire konstantne delovne in jalove moči ali konstantne delovne moči in napetosti [7]. Izbira modela je odvisna od načina obratovanja razpršenega vira. Model uporabljenega distribucijskega omrežja vsebuje razpršene vire tipa MHE in MFE. Ker želimo na napetostni profil vplivati posredno, ne da bi neposredno spreminjali napetosti omrežja, so v ta namen razpršeni viri električne energije predstavljeni kot viri konstantne moči. Za posamezen razpršeni vir so podane vrednosti delovne moči P_{gen} in jalove moči Q_{gen} .

Prav tako kot ustrezno modeliranje razpršenih virov, predstavlja modeliranje bremen pomemben del izračuna. Za bremena, priključena v distribucijsko omrežje, sta po navadi podani vrednosti delovne moči bremena P_{brm} in jalove moči bremena Q_{brm} . Ti vrednosti zavisita od napetosti vozlišča, kamor je breme priključeno. V tem članku so uporabljena bremena konstantne moči, ki so simetrična trifazna.

Največkrat se izračuni pretokov energije izvajajo v sistemu enotinih vrednosti. Pred izračunom pretokov energije je tako potrebno izvesti preračun vseh parametrov omrežja (vhodni podatki), kot tudi podatkov o proizvodnji električne energije iz razpršenih virov ter porabi električne energije v sistem enotinih vrednosti.

3.1 Testni model daljnovodov Rastke in Logarska dolina

Za analizo vpliva razpršenih virov na distribucijsko omrežje Zgornje Savinjske doline potrebujemo v ustrezni obliki pripravljen model omrežja. Primerno urejen model bo ob ustrezni predstavitvi vhodnih podatkov preglednejši. Ob tem bo program, namensko pripravljen za branje podatkov, obdelavo in optimizacijo vhodnih podatkov v programskem paketu Matlab, deloval optimalno. Postopek obdelave podatkov za potrebe priprave Excelove datoteke vhodnih podatkov je v celoti enak tako za daljnovod Rastke, kot tudi za daljnovod Logarska dolina.

Končni model omrežja je zapisan v Excelovi datoteki vhodnih podatkov, praktični primer tabele je za daljnovod Rastke prikazan s tabelo 21.2. Za vsakega od dveh obravnavanih daljnovodov je ločeno pripravljena ustrezna tabela z urejenimi vhodnimi podatki. Tabeli v nadaljevanju bere programska koda, ki je pripravljena v programskem paketu Matlab. Osnovna oziroma izvorna programska koda v programskem paketu Matlab je bila uporabljena v [5], [6] in [8]. V tem članku je bila ta spremenjena in ustrezno prilagojena modelu omrežja, branju vhodnih podatkov, drugačnim kriterijem, vrednostim baznih podatkov, dodatnem upoštevanju razpršenih virov tipa MHE, različnim obratovalnim stanjem omrežja,...

Tabela 21.2: Excelova datoteka vhodnih podatkov omrežja daljnovoda Rastke

oddVoz	sprVoz	kabel	r (ohm/km)	x (ohm/km)	I _{max} (A)	dolVod (m)	lme_TP	TP S _n (kVA)	sonce P _{gen} (kW)	voda P _{gen} (kW)	P _{fe} (W)
1	2	tuje omrežje	0,94	9,41	1000	1	tujeOM	0	0	0	0
2	3	XHE48 1X150	0,12	0,22	540	76,60	0	0	0	0	0
3	4	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	150,94	0	0	0	0	0
4	5	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	119,51	0	0	0	0	0
4	6	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	311,31	0	0	0	0	0
5	7	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	60,73	0	0	0	0	0
6	8	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	475,44	0	0	0	0	0
7	9	TR160	37,63	91,67	1000	1	T314	160	0	0	383
8	10	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	571,60	0	0	0	0	0
8	11	TR35	339,00	313,29	1000	1	T475	35	0	0	114
10	12	TR35	339,00	313,29	1000	1	T476	35	11,73	0	114
10	13	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	365,56	0	0	0	0	0
13	14	TR100	71,85	143,16	1000	1	T580	100	0	0	321
13	15	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	901,92	0	0	0	0	0
15	16	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	53,93	0	0	0	0	0
15	17	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	1478,04	0	0	0	0	0
16	18	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	14,98	0	0	0	0	0
17	19	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	69,75	0	0	0	0	0
17	20	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	122,75	0	0	0	0	0
18	21	TR100	71,85	143,16	1000	1	T126	100	0	0	321
19	22	XHP48A 1X150	0,19	0,19	360	44,04	0	0	0	0	0
19	23	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	1	0	0	0	0	0
20	24	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	553,70	0	0	0	0	0
22	25	TR1600	1,95	14,65	1000	1	T406	1600	0	1316	1450
23	26	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	18,66	0	0	0	0	0
24	27	PAS 1X35	0,82	0,32	140	1	0	0	0	0	0
24	28	PAS 1X35	0,82	0,32	140	1	0	0	0	0	0
24	29	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	337,39	0	0	0	0	0
26	30	TR160	37,63	91,67	1000	1	T125	160	0	22	383
27	31	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	1004,88	0	0	0	0	0
28	32	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	582,58	0	0	0	0	0
29	33	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	1294,04	0	0	0	0	0
29	34	TR250	66,88	180,23	1000	1	T413	250	160	19	589
31	35	TR100	71,85	143,16	1000	1	T409	100	49,7	0	321
31	36	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	1145,70	0	0	0	0	0
32	37	TR160	37,63	91,67	1000	1	T410	160	0	0	383
33	38	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	49,39	0	0	0	0	0
33	39	TR160	37,63	91,67	1000	1	T408	160	0	0	383
36	40	TR250	66,88	180,23	1000	1	T459	250	49,7	56	589
36	41	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	713,94	0	0	0	0	0
38	42	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	337,53	0	0	0	0	0
41	43	TR250	66,88	180,23	1000	1	T415	250	0	563	589
41	44	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	1	0	0	0	0	0
42	45	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	801,08	0	0	0	0	0
42	46	AL/FE 35/6	0,82	0,38	145	51,21	0	0	0	0	0
44	47	XHE48A 1X70	0,41	0,22	250	603,47	0	0	0	0	0
45	48	TR250	66,88	180,23	1000	1	T411	250	0	205	589
46	49	TR250	66,88	180,23	1000	1	T424	250	0	317	589
47	50	TR630	21,56	87,26	1000	1	T094	630	0	0	921

V srednjenapetostnih distribucijskih omrežjih pogosto nimamo točnih podatkov oziroma profilov porabe oziroma obremenitev ter profilov proizvedene električne energije iz razpršenih virov, ampak so te vrednosti na različne načine ocenjene. V Elektru Celje, d. d. so v več kot 80 odstotkih SN/NN transformatorskih postaj vgrajeni "pametni" števeci električne energije, ki merijo veličine, kot so električna energija (A), fazna napetost (U), fazni tok (I), delovno moč P in jalovo moč Q , merjene veličine pa so odvisne od tipa števca. Omenjeni delež predstavljajo transformatorske postaje, v katerih so vgrajeni SN/NN transformatorji nazivnih moči $S_n \geq 50$ kVA. V članku so bili podatki o obremenitvah za vsako posamezno transformatorsko postajo na obravnavanih daljnovodih izvoženi v obliki Excelovih datotek. V njih so zapisani podatki v obliki povprečnih urnih obremenitev za celotno koledarsko leto. Enak postopek je bil izveden za vse razpršene vire tipa MHE in MFE. Za razliko od profilov obremenitev so bili slednji podatki izvoženi iz AMI-ja v obliki urnih povprečij za vsak posamezen razpršeni vir, priključen na daljnovoda Rastke in Logarska dolina. Iz pridobljenih meritev so bili pripravljani povprečni in maksimalni profil obremenitve in proizvodnje.

4 Backward/forward sweep metoda za izračun pretokov energije

V osnovi backward/forward sweep metoda izkorišča radialno obliko distribucijskega omrežja in računa pretoke energije v dveh korakih (1. korak backward sweep in 2. korak forward sweep). Koraka se iterativno ponavlja do točke izpolnitve konvergenčnega kriterija.

Na osnovi prvega Kirchhoffovega zakona se v 1. koraku, tako imenovanem backward sweep koraku, računajo vrednosti tokov v vejah. Seštevanje tokov v vejah poteka vzvratno (ang. backward), kar pomeni, da korak poteka od najbolj oddaljenega vozlišča od bilančnega vozlišča proti bilančnemu vozlišču.

V 2. koraku, tako imenovanem forward sweep koraku, se z rezultati tokov vej, dobljenimi v 1. koraku, računajo napetosti vozlišč, in sicer od bilančnega vozlišča proti najbolj oddaljenemu oziroma končnemu vozlišču.

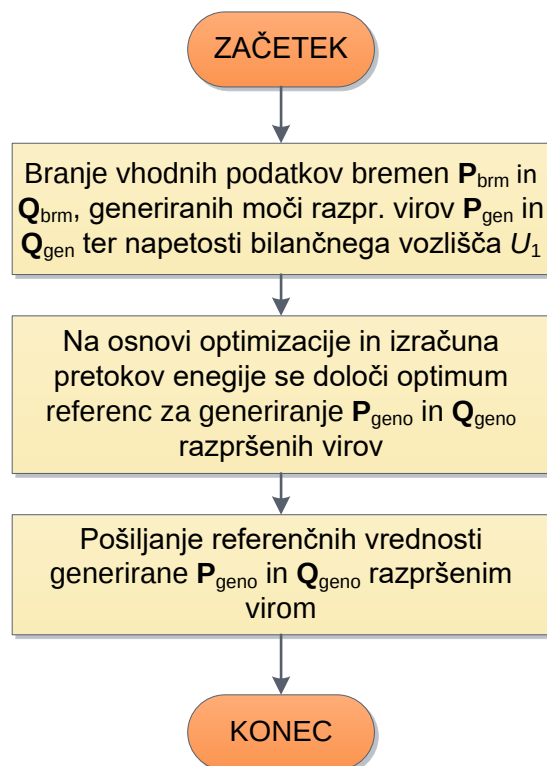
5 Optimizacija in algoritem za generiranje referenčnih vrednosti delovne in jalove moči razpršenih virov električne energije

Optimizacija je matematično gledano iskanje minimuma in maksimuma funkcije znotraj določenih mej ob izpolnjevanju ene ali več enačb in neenačb [9]. V splošnem se probleme optimizacije obravnava z iskanjem minimalne vrednosti kriterijske funkcije $q(\mathbf{x})$. Rešitev optimizacije predstavlja nabor elementov vektorja parametrov kriterijske funkcije $\mathbf{x}$, pri katerem je vrednost $q(\mathbf{x})$ najmanjša, ob istočasni izpolnitvi m števila omejitvenih neenačb in n omejitvenih enačb, katere se po navadi prevede v neenačbe.

5.1 Algoritem za generiranje referenčnih vrednosti delovne in jalove moči

Princip algoritma, je sledeč; na osnovi obratovalnega stanja (kot obratovalno stanje se razume določena obremenitev omrežja, ki vključuje porabo in proizvodnjo električne energije iz razpršenih virov), se za model omrežja izvede izračun pretokov energije. S postopkom optimizacije algoritem nato določi ustrezne referenčne vrednosti generacije delovne in jalove moči razpršenih virov. Referenčne vrednosti so določene na način, da so obenem tudi izgube v omrežju minimalne.

V primeru, ko zgolj z optimizacijo ter generacijo jalove moči razpršenih virov ne moremo zagotoviti ustreznega napetostnega profila, lahko algoritem za generacijo delovne in jalove moči razpršenih virov določi vrednosti generacije delovne moči razpršenih virov na način, da je napetostni profil omrežja ustrezen. Pogoji v tem primeru je, da je zmanjšanje oziroma redukcija generacije delovne moči razpršenih virov minimalna. Za to skrbi algoritem za generiranje referenčnih vrednosti delovne in jalove moči razpršenih virov, ki temelji na optimizacijski metodi diferenčne evolucije. V algoritmu metoda diferenčne evolucije skrbi za iskanje parametrov, ki predstavljajo referenčne vrednosti generacije delovne in jalove moči razpršenih virov. Iskani parametri so nadalje ovrednoteni s kriterijsko funkcijo $q(\mathbf{x})$, kjer je uporabljen algoritem za izračun pretokov energije. Algoritem za generacijo delovne in jalove moči razpršenih virov v nadaljevanju izračuna vrednosti napetosti vozlišč in vrednost izgub. Izračunane vrednosti napetosti in izgub sta uporabljeni lastnosti kriterijske funkcije $q(\mathbf{x})$, ki ju z uporabo algoritma minimiziramo. Slika 21.6 prikazuje eno ponovitev oziroma iteracijo algoritma, je splošno uporaben za različna obratovalna stanja.



Slika.21.6: Diagram poteka ene ponovitve oziroma iteracije algoritma za generacijo referenčnih vrednosti delovne moči P_{geno} in jalove moči Q_{geno} razpršenih virov

6 Rezultati

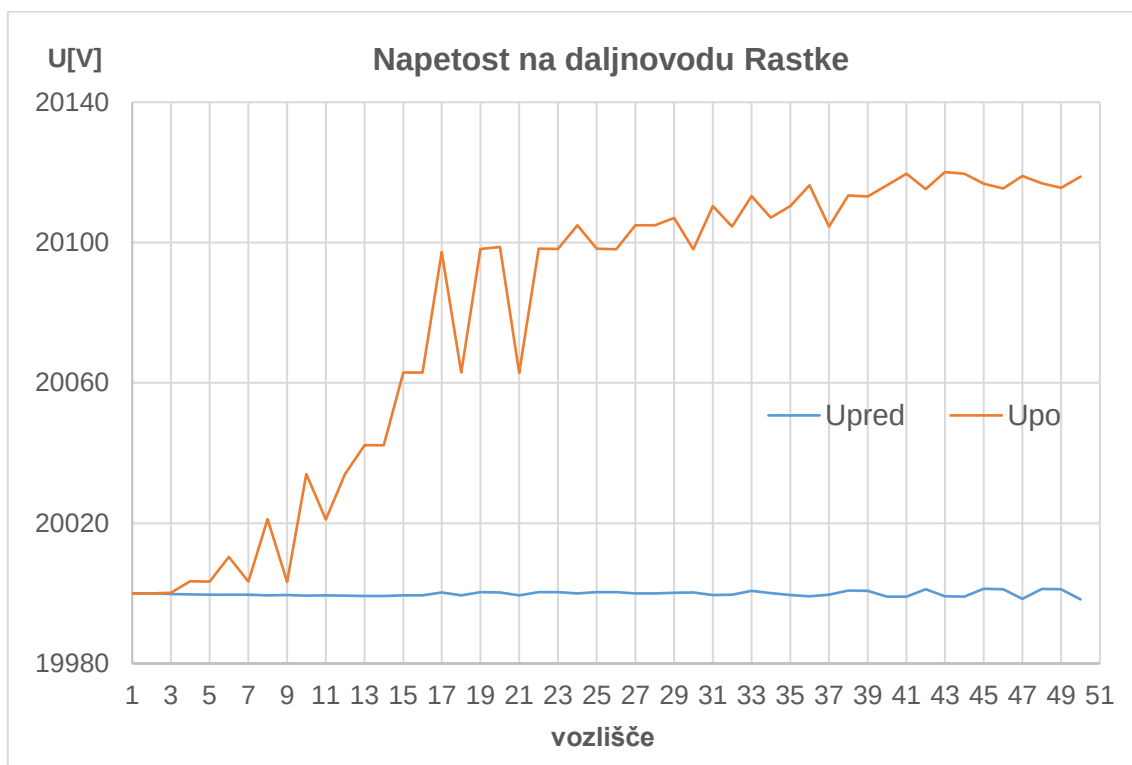
Rezultati so pridobljeni na osnovi algoritma za generacijo referenčnih vrednosti delovne in jalove moči razpršenih virov, ki je prikazan na sliki 21.7. Za razpršene vire električne energije je predpostavljeno, da vključujejo tako MHE kot MFE s faktorjem moči $\cos\varphi = 0.95$. Rezultati proizvodnje električne energije iz razpršenih virov oziroma generacije referenčnih vrednosti delovne moči P_{geno} in jalove moči Q_{geno} razpršenih virov so prikazani za eno iteracijo algoritma v mescu aprilu ter eno obratovalno stanje (OS) omrežja. Mesec april je bil izbran kot mesec, za katerega je značilna velika količina padavin. Ta dejavnik neposredno vpliva na količino proizvedene električne energije iz razpršenih virov in s tem poveča vpliv razpršenih virov tipa MHE na razmere v omrežju. Časovni korak izračuna obratovalnega stanja je 1 ura, natančneje, prikazani so rezultati za povprečni dan meseca aprila v izbranem časovnem oknu med 11. in 12. uro.

Generiranje referenčnih vrednosti delovne P_{geno} in jalove moči Q_{geno} MHE in MFE je izvedeno na osnovi optimizacije in izračunov pretokov energije z metodo backward/forward sweep. Izračun pretokov energije je izveden neodvisno za oba obravnavana daljnovoda. Nizkonapetostni izvodi in nizkonapetostni odseki teh izvodov v transformatorskih postajah so zanemarjeni, moči priključenih bremen in razpršenih virov so upoštevane na srednenapetostnih strani. Pri tem so bile predhodno določene in izračunane vrednosti parametrov na dejanskem stanju naprav in v normalnem obratovalnem stanju omrežja, napetost bilančnega vozlišča (2) je 20 kV, vrednosti generacije jalove moči razpršenih virov Q_{gen} pred optimizacijo so 0 VAr. V prikazanem obratovalnem stanju so v omrežje priključeni tako porabniki električne energije kot tudi razpršeni viri. Omrežje je povprečno obremenjeno, razpršeni viri proizvajajo električno

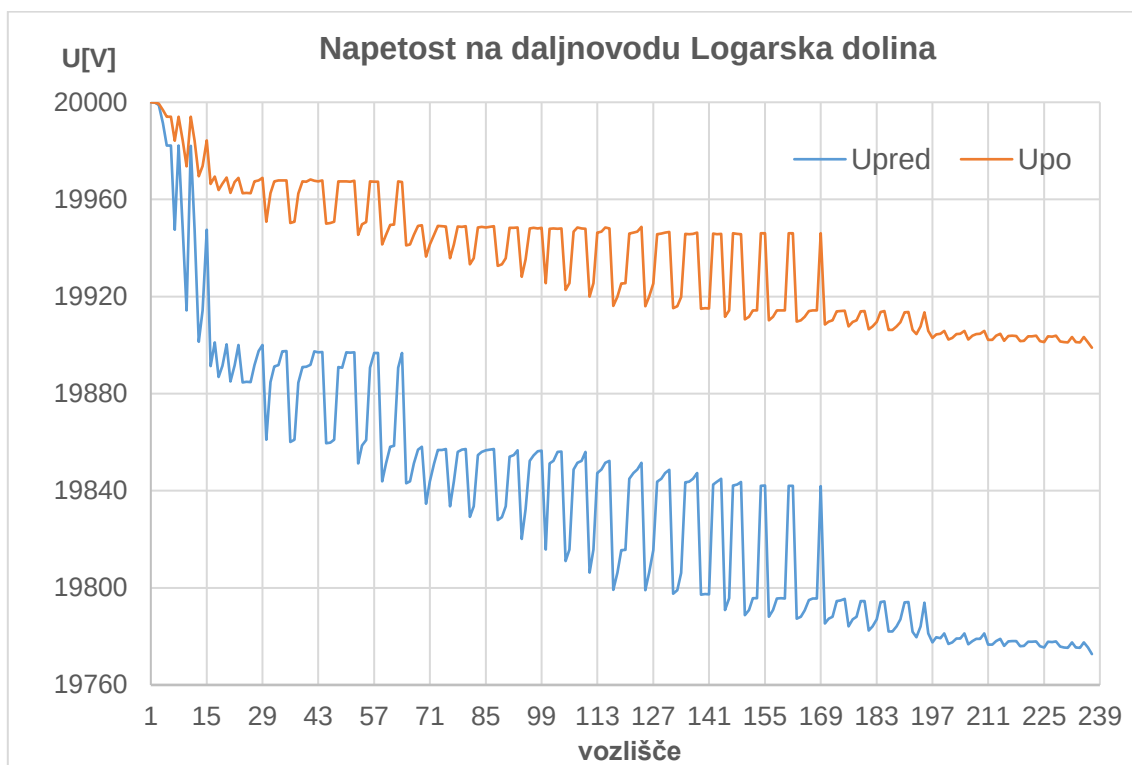
energijo s 50 % maksimalne možne proizvodnje, kar pomeni, da je uporabljen maksimalni profil proizvodnje, znižan na 50 %, ter povprečni profil porabe.

Cilj optimizacije v prikazanem obratovalnem stanju je zmanjšanje izgub na posameznem daljnovodu ob predpostavki, da se generacija delovne moči po optimizaciji ne spreminja, spreminja se samo generacija jalove moči. Iskani parametri z optimizacijo v obratovalnem stanju so optimalna generacija jalove moči v vozliščih, kjer so priključeni razpršeni viri.

Za ovrednotenje rezultatov bodo prikazane napetosti ter vrednosti izgub posameznega daljnovoda po mesecih. Kot rezultat optimizacije v obratovalnem stanju je v nadaljevanju najprej grafično prikazan napetostni profil posameznega daljnovoda pred in po optimizaciji, sledi tabelarni prikaz z vrednostmi delovne in jalove moči bremen, generacijo delovne moči razpršenih virov pred in jalove moči po optimizaciji ter skupna vrednost izgub na posameznem daljnovodu, natančneje skupna vrednost izgub za povprečni dan posameznega meseca v terminu med 11. in 12. uro.



Slika 21.7: Napetost pred in po optimizaciji na daljnovodu Rastke



Slika 21.8: Napetost pred in po optimizaciji na daljnovodu Logarska dolina

Sliki 21.7 in 21.8 prikazujeta potek napetosti obeh obravnavanih daljnovodov pred in po optimizaciji. Prva krivulja (črta modre barve in oznaka U_{pred}) predstavlja napetost na daljnovodu pred optimizacijo v [V], druga krivulja (črta oranžne barve in oznaka U_{po}) predstavlja napetost na daljnovodu po optimizaciji v [V].

Oblika napetostnega profila na daljnovodu Rastke je pred optimizacijo položna, kar pomeni, da je napetost v bilančnem vozlišču (2) praktično enaka napetosti končnega vozlišča (50). Natančneje, napetost bilančnega vozlišča (2) znaša pred in po optimizaciji 20 kV, napetost končnega vozlišča (50) na daljnovodu Rastke pred optimizacijo zavzema vrednost 19998 V, po izvedeni optimizaciji pa vrednost 20118 V. Napetost končnega vozlišča (50) je na daljnovodu Rastke po optimizaciji za 120 V višja kot pred optimizacijo. Naraščajoči napetostni profil po optimizaciji pomeni, da je povprečna obremenitev omrežja manjša kot je proizvedena električna energija iz razpršenih virov v primeru 50-odstotne maksimalne proizvodnje električne energije.

Napetostni profil na daljnovodu Logarska dolina je v primerjavi z daljnovodom Rastke padajoč, in to tako pred kot tudi po optimizaciji. Napetost bilančnega vozlišča (2) znaša pred in po optimizaciji 20 kV, napetost končnega vozlišča (237) na daljnovodu Logarska dolina pred optimizacijo zavzema vrednost 19772 V, po izvedeni optimizaciji pa vrednost 19899 V. Napetost končnega vozlišča (237) na daljnovodu Logarska dolina je po optimizaciji za vrednost 127 V višja kot pred optimizacijo. Padajoči napetostni profil pomeni, da je povprečna obremenitev omrežja na daljnovodu Logarska dolina višja kot je proizvedena električna energija iz razpršenih virov v primeru 50-odstotne maksimalne proizvodnje električne energije, kar velja tako pred kot tudi po optimizaciji. Z ustrezno generacijo jalove moči razpršenih virov lahko napetostni profil izboljšamo in še vedno ostanemo znotraj dovoljenih mej padca oziroma porasta napetosti.

Tabela 21.3: Delovne in jalove moči bremen ter razpršenih virov pred in po optimizaciji na daljnovodu Rastke

vozlišč e	P_{brm} [W]	Q_{brm} [VAr]	P_{gen} [W]	P_{geno} [W]	ΔP_{gen} [W]	Q_{gen} [VAr]	Q_{geno} [VAr]
12	6886	3588	-5138	-5138	0	0	1800
25	314804	164013	-576458	-576458	0	0	201899
30	31480	16401	-9637	-9637	0	0	3375
34	49188	25627	-78409	-78409	0	0	27462
35	19675	10251	-21770	-21770	0	0	7625
40	49188	25627	-46301	-46301	0	0	16216
43	49188	25627	-246615	-246615	0	0	86375
48	49188	25627	-89798	-89798	0	0	31451
49	49188	25627	-138858	-138858	0	0	48634

Tabela 21.4: Delovne in jalove moči bremen ter razpršenih virov pred in po optimizaciji na daljnovodu Logarska dolina

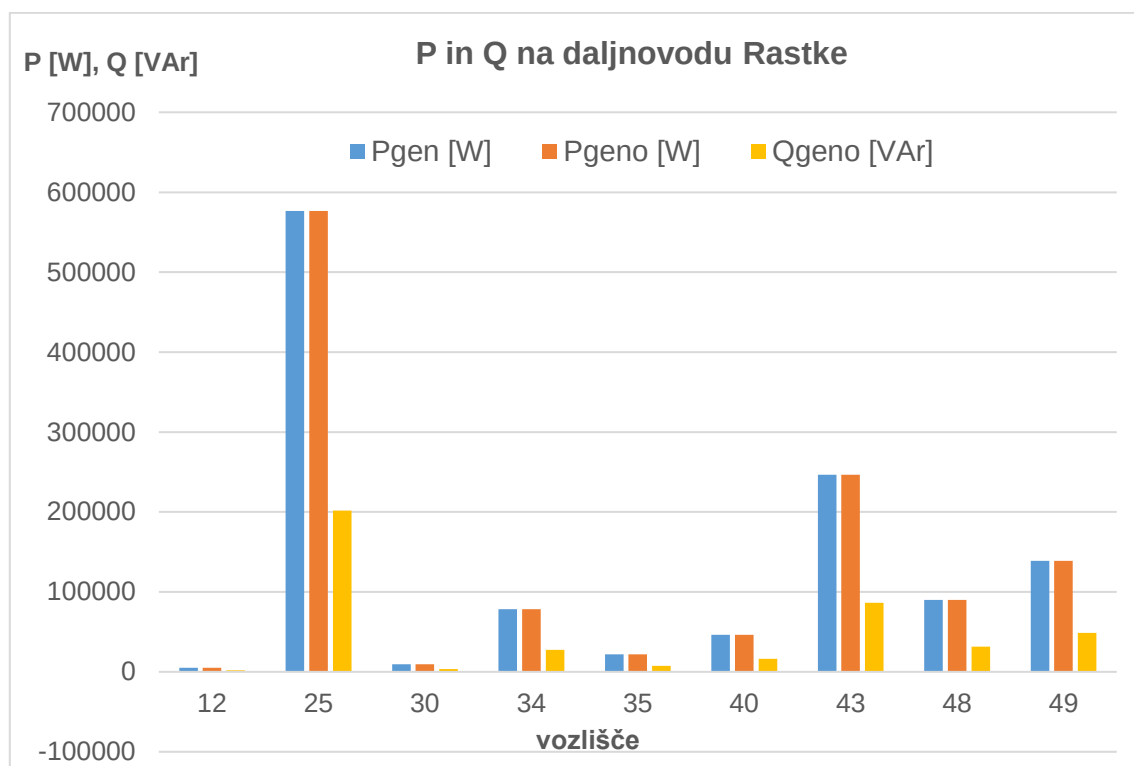
vozlišče	P_{brm} [W]	Q_{brm} [VAr]	P_{gen} [W]	P_{geno} [W]	ΔP_{gen} [W]	Q_{gen} [VAr]	Q_{geno} [VAr]
14	6886	3588	15331	15331	0	0	5694
15	9838	5125	43042	43042	0	0	15987
26	78701	41003	5694	5694	0	0	2115
41	49188	25627	313416	313416	0	0	116411
48	31480	16401	26282	26282	0	0	9762
52	123954	64580	87608	87608	0	0	32540
63	19675	10251	18363	18363	0	0	6820
72	31480	16401	4380	4380	0	0	1627
74	49188	25627	23400	23400	0	0	8691
77	9838	5125	5256	5256	0	0	1952
86	19675	10251	12265	12265	0	0	4556
87	9838	5125	10679	10679	0	0	3967
95	9838	5125	6133	6133	0	0	2278
116	9838	5125	12265	12265	0	0	4556
120	19675	10251	28034	28034	0	0	10413
124	9838	5125	57821	57821	0	0	21476
127	19675	10251	5694	5694	0	0	2115
134	49188	25627	2738	2738	0	0	1017
141	49188	25627	16207	16207	0	0	6020
149	31480	16401	9199	9199	0	0	3417
165	19675	10251	9637	9637	0	0	3579
169	78701	41003	87608	87608	0	0	32540
175	9838	5125	4380	4380	0	0	1627
178	31480	16401	39423	39423	0	0	14643
185	19675	10251	28034	28034	0	0	10413
194	6886	3588	13141	13141	0	0	4881
202	31480	16401	15331	15331	0	0	5694
210	9838	5125	10075	10075	0	0	3742
214	31480	16401	24968	24968	0	0	9274
228	9838	5125	9199	9199	0	0	3417

V tabeli 21.3 in tabeli 21.4 so prikazane vrednosti delovne in jalove moči bremen ter razpršenih virov pred in po optimizaciji daljnovoda Rastke in daljnovoda Logarska dolina. V njih predstavlja P_{brm} delovno moč bremena v [W], Q_{brm} jalovo moč bremena v [VAr], P_{gen} delovno moč razpršenega vira pred optimizacijo v [W], P_{geno} delovno moč razpršenega vira po optimizaciji v [W], ΔP_{gen} razliko delovne moči razpršenega vira v [W] izračunano z (6.1), Q_{gen} jalovo moč razpršenega vira pred optimizacijo v [VAr] ter Q_{geno} generirano jalovo moč razpršenega vira po optimizaciji v [VAr].

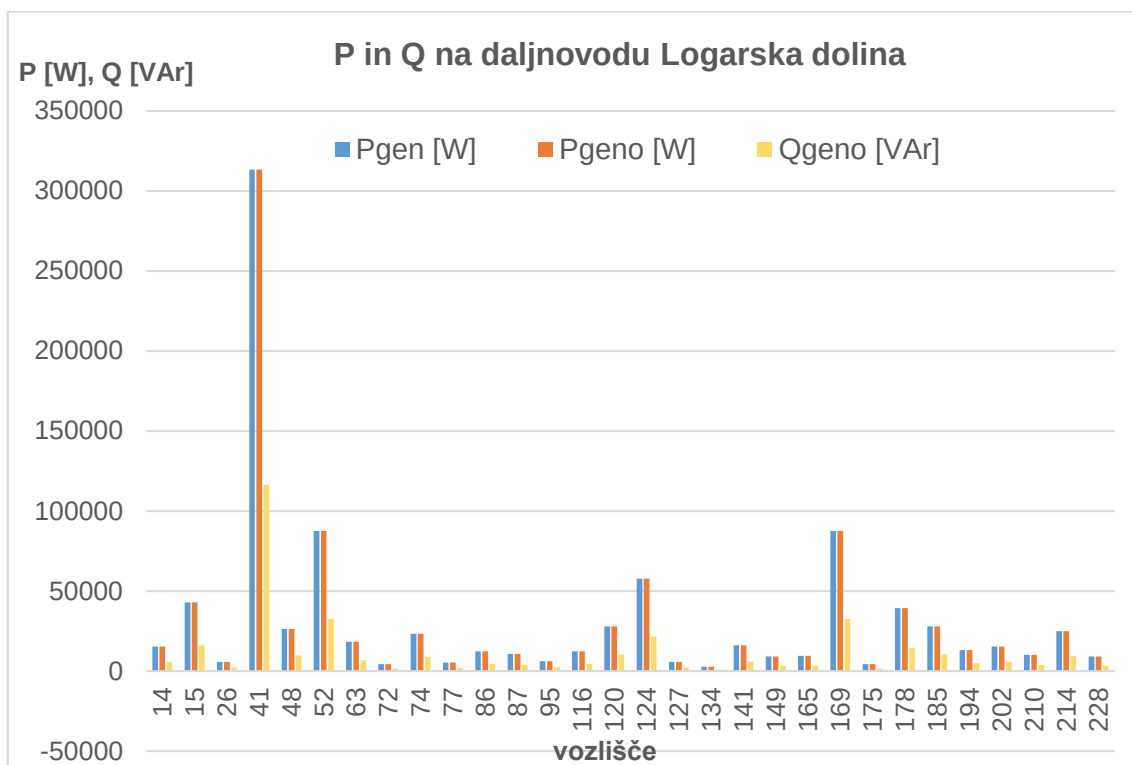
$$\Delta P_{gen} = P_{gen} - P_{geno} \quad (6.1)$$

Iz stolpca 2 in stolpca 3 tabele 21.3 in tabele 21.4 je razvidno, da so v omrežje priključena bremena, saj so vrednosti različne od nič. Iz stolpca 4 tabele 9.10 in tabele 9.11 je razvidno, da so v omrežje prav tako priključeni razpršeni viri, saj so tudi te vrednosti različne od 0. Pomembna ugotovitev, ki sledi iz rezultatov tabele 21.3 in tabele 21.4, je, da je po izvedeni optimizaciji generirana delovna moč razpršenih virov enaka kot pred optimizacijo ($P_{\text{gen}} = P_{\text{geno}}$). To pomeni, da pri optimizaciji ni bila omejena generacija delovne moči nobenemu razpršenemu viru, referenčne vrednosti generacije jalove moči pa so bile določene ob kriteriju, da so izgube v omrežju minimalne. Vrednost jalove moči razpršenega vira pred optimizacijo Q_{gen} znaša 0 VAr, vrednosti jalove moči razpršenega vira po optimizaciji Q_{geno} so prikazane v zadnjem, 8. stolpcu tabele 21.3 in tabele 21.4.

V smislu boljše predstave rezultatov so predhodno podani rezultati v tabele 21.3 in tabele 21.4 v nadaljevanju predstavljeni grafično na sliki 21.9 za daljnovod Rastke ter sliki 21.10 za daljnovod Logarska dolina. Na sliki 21.9 in sliki 21.10 so vse vrednosti rezultatov iz tabel 21.9 in 21.10 zaradi lažje ponazoritve pozitivne.



Slika 21.9: Delovna in jalova moč razpršenih virov pred in po optimizaciji na daljnovodu Rastke



Slika 21.10: Delovna in jalova moč razpršenih virov pred in po optimizaciji na daljnovidu Logarska dolina

Izgube so prikazane v tabeli 21.5 za daljnovid Rastke in tabeli 21.6 za daljnovid Logarska dolina. V tabeli 21.5 in tabeli 21.6 predstavlja P_{izg_pred} izgube daljnovoda pred optimizacijo v [W], P_{izg_po} izgube daljnovoda po optimizaciji v [W], ΔP_{izg} razliko oziroma zmanjšanje izgub posameznega daljnovoda v [W], izračunano z (9.2), ter Q_{geno} generirano jalovo moč posameznega daljnovoda po optimizaciji v [VAr].

$$\Delta P_{izg} = P_{izg_pred} - P_{izg_po} \quad (9.2)$$

Tabela.21.5: Izgube na daljnovidu Rastke

OS3	januar	februar	marec	april	maj	junij	julij	avgust	september	oktober	november	december
P_{izg_pred} [W]	8892	9293	8647	9641	8805	8896	8592	8619	8626	9242	8601	8555
P_{izg_po} [W]	7590	7973	7114	8012	7517	7626	7100	6999	6521	7952	7016	6892
ΔP_{izg} [W]	1303	1320	1533	1629	1288	1270	1492	1620	2105	1290	1585	1664
Q_{geno} [VAr]	-294167	-265238	-297658	-424837	-342739	-370614	-317352	-256293	-326257	-424929	-209924	-302650

Tabela 21.6: Izgube na daljnovidu Logarska dolina

OS3	januar	februar	marec	april	maj	junij	julij	avgust	september	oktober	november	december
P_{izg_pred} [W]	29771	31528	27568	23569	25199	24613	25799	27989	25535	25106	27629	27696
P_{izg_po} [W]	26031	28792	22238	19060	22196	20088	22518	23929	22215	20222	23909	24481
ΔP_{izg} [W]	3740	2737	5330	4509	3003	4525	3281	4061	3320	4884	3720	3215
Q_{geno} [VAr]	-198764	-169150	-304706	-351222	-350854	-379389	-324866	-262361	-333982	-434990	-214895	-309816

Pomembna ugotovitev, ki sledi iz rezultatov tabele 6.3 in tabele 6.4, je, da so izgube pred optimizacijo generacije jalove moči večje kot po optimizaciji. Z ustrezno generacijo jalove moči na nivoju razpršenih virov se po srednjenapetostnih vodih pretaka manj jalove energije, s

tem se znižajo skupne izgube ter ob tem izboljša napetostni profil. Ta ugotovitev velja za oba obravnavana daljnovoda.

7 Sklep

Distribucijska omrežja so bila v zadnjih nekaj letih deležna precejšnih sprememb. V njih se je v času ugodnih subvencij priključevalo veliko število predvsem malih fotovoltaičnih elektrarn (MFE) do velikosti oziroma moči 10 MW. Te vplivajo na napetostni profil omrežja ter izgube. Mesta priključitve so se preverjala po obstoječih metodah priključitve, zapisane v sistemskih obratovalnih navodilih za distribucijska omrežja (SONDO, priloga 5) in zmožnostih posameznih distribucijskih podjetij ter na tej osnovi izdajala soglasja za priključitve. Obstoječe metode spremembam omrežja zadnjih let niso sledile.

Spremembe omrežja poleg tega potrebujejo tudi spremembo v načinu vodenja, obratovanja, posluževanja ter izvajanja različnih analitičnih pristopov v različnih obratovalnih stanjih. Eno izmed takšnih programskih orodij v podjetju Elektro Celje, d. d., predstavlja programsko orodje DMS. To programsko orodje v osnovi potrebuje natančne podatke topologije omrežja, tako imenovane statične podatke omrežja, katerih vir je GIS. Drugi del podatkov je vsaj toliko, če ne celo bolj pomemben za ustrezno in kvalitetno analizo omrežja. Ta del podatkov predstavljajo dinamični podatki oziroma dejanske meritve omrežja. Samo skupek teh podatkov s poudarkom na njihovi točnosti tvori vhodne podatke za izvajanja analiz omrežja.

V članku je bil cilj na ustrezen način preveriti nekoliko drugačen pristop obvladovanja omrežja ter preveriti napetostne profile in izgube ob ustrezni generaciji delovne in jalove moči razpršenih virov. Za ta namen je bilo najprej potrebno ustrezno modelirati omrežje. Uporabljen je bil praktičen primer distribucijskega omrežja na področju Zgornje Savinjske doline, za katerega so bili pridobljeni in na voljo vsi potrebni vhodni podatki za izvedbo analize.

Pomembna ugotovitev iz rezultatov analiz se nanaša na izgube in napetostni profil omrežja. Z ustrezno generacijo jalove moči lahko vplivamo tako na napetostni profil kot tudi na izgube v omrežju. Napetostni profil se z optimizacijo in ustrezno generacijo delovne in jalove moči vzdolž voda izboljša, izgube se zmanjšajo. Proizvajalci električne energije lahko ob ustrezni generaciji jalove moči (po potrebi tudi delovne moči) distribucijskim podjetjem dodatno pomagajo pri izboljšanju napetostnega profila ter zmanjšanju izgub, saj se jalovo moč kompenzira lokalno in se jalova energija po nepotrebem ne pretaka po omrežju.

Minimalne izgube v omrežju bi dosegli v primeru, ko bi generacija delovne moči sledila porabi električne energije v omrežju. Naslednja možnost zmanjšanja izgub je priključitev ustreznega števila razpršenih virov ustrezne moči, s katerimi bi bile glede na dnevne krivulje porabe in generacijo razpršene proizvodnje izgube minimalne.

Optimizacija proizvodnje razpršenih virov v distribucijskih omrežjih bo imela v prihodnosti precejšnjo vlogo predvsem pri obratovanju distribucijskega omrežja. Ta na eni strani zagotavlja ustrezni napetostni profil in zmanjšanje izgub pri prenosu električne energije, na drugi strani pa omogoča povečano in varno priključevanje novih oziroma dodatnih razpršenih virov električne energije v takšno omrežje ob upoštevanju SONDO in dovoljenim porastom napetosti 2 % na srednjenapetostni strani distribucijskega omrežja.

Za ugotavljanje učinkov, ki jih ima ustrezna generacija jalove moči razpršenih virov na distribucijsko omrežje, je potrebno poleg topologije omrežja nujno poznati tudi profile obremenitve omrežja in proizvodnje električne energije iz razpršenih virov.

Literatura

- [1] Elektro Celje, d. d., Podatki iz arhiva podjetja Elektro Celje, d. d., Celje, 2010–2015.
- [2] Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D., Strbac, G. Embedded Generation. The Institution of Electrical Engineers. London, 2000.
- [3] Agencija za energijo. Distribucijsko omrežje, dostopno na <http://www.agen-rs.si/distribucijsko-omrezje1> [8.12.2015].
- [4] Wikipedija, Zgornja Savinjska dolina, dostopno na https://sl.wikipedia.org/wiki/Zgornja_Savinjska_dolina [8.12.2015].
- [5] E. Belič, Optimizacija proizvodnje razpršenih virov v distribucijskem omrežju ob upoštevanju napetostih profilov in minimizacije prenosnih izgub, Magistrsko delo, Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, 2013.
- [6] N. Srečković, Ovrednotenje metod za izračun pretokov energije v nizkonapetostnem distribucijskem omrežju, Magistrsko delo, Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, 2014.
- [7] Kersting, W.H. Distribution System Modeling and Analysis. New Mexico: CRC press, 2002.
- [8] D. Hrastnik, Analiza vpliva razpršenih virov električne energije na distribucijsko omrežje Zgornje Savinjske doline, Magistrsko delo, Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, 2016.
- [9] Javornik, M. Prenos električne energije v distribucijskih omrežjih z razpršeno proizvodnjo, Diplomsko delo, Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, 2010.