

Tomislav Alinjak
HEP ODS d.o.o. Elektra Slavonski Brod
tomislav.alinjak@hep.hr

Marinko Stojkov
Strojarski fakultet Slavonski Brod
mstojkov@sfsb.hr

Ivica Pavić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ivica.pavic@fer.hr

Kruno Trupinić
HEP ODS d.o.o. Elektra Slavonski Brod
kruno.trupinic@hep.hr

OPTIMIZACIJA NAPONSKE REGULACIJE OGRANIČAVANJEM RADNE SNAGE FOTONAPONSKIH ELEKTRANA U NISKONAPONSKIM MREŽAMA METODOM UMJETNIH KOLONIJA PČELA

SAŽETAK

Kod mreža s velikim udjelom fotonaponskih elektrana najveći izazov je naponska regulacija budući da povećana proizvodnja uzrokuje povećanje napona, dok u trenucima kad nema proizvodnje ta ista mreža mora zadovoljiti uvjete propisanih padova napona. Takvi uvjeti uvelike smanjuju kapacitet distribucijske mreže za priključenje novih fotonaponskih elektrana. Kako bi se omogućilo priključenje povećanog broja takvih elektrana, nužna je promjena dosadašnjeg pristupa u vođenju mreže koja podrazumijeva upravljanje snagama elektrana koje se predaju u mrežu.

U ovom članku će se dati pregled dosadašnjih istraživanja i iskustava drugih država na području upravljanja fotonaponskim elektranama. Konačno će se prikazati ideja optimizacije izlaznih snaga metodom umjetnih kolonija pčela kojom se u određenom trenutku želi izračunati maksimalna snaga koju pojedina elektrana može u predati u mrežu, a da naponi ne prijeđu zadanu gornju granicu.

Ključne riječi: fotonaponske elektrane, naponska regulacija, optimizacija, automatizacija, metoda umjetnih kolonija pčela

OPTIMIZATION OF VOLTAGE REGULATION WITH ACTIVE POWER CURTAILMENT OF PHOTOVOLTAICS IN LOW VOLTAGE GRIDS BY ABC METHOD

SUMMARY

The biggest challenge in grids with high penetration of photovoltaics is voltage regulation because increased generation causes overvoltages while the same grid has to deal with voltage drops when there is no generation. These conditions reduce the capacity of distribution system for connecting new PVs. To raise the capacity, it is necessary to implement strategies to manage power flows from PVs to grid.

In this paper will be given a short review of former researches and experiences of other countries in the field of active power curtailment. Finally, an optimization of output active power of photovoltaics by using artificial bee colony method will be presented in order to maximize the active power of every photovoltaic in a certain moment while the voltages of all nodes remain lower than the upper permissible limit.

Key words: photovoltaics, voltage regulation, optimization, automatization, ABC method

1. UVOD

U posljednjem desetljeću rast cijene električne energije, pad cijene opreme i relativno visoki poticaji doveli su do naglog porasta udjela fotonaponskih elektrana. Do 2000. godine ukupna instalirana snaga fotonaponskih elektrana na svijetu je iznosila oko 1 GW, a do kraja 2010. godine se povećala na 40 GW. Već 2012. godine ukupna instalirana snaga je iznosila preko 100 GW. Tijekom 2013. i 2014. godine godišnje povećanje instalirane snage je iznosilo oko 38 GW, a u 2015. godini preko 50 GW te je ukupno iznosilo oko 230 GW [1]. Na kraju 2016. godine procjenjuje se da je ukupna svjetska instalirana snaga fotonaponskih elektrana iznosila oko 303 GW čija proizvodnja može pokriti oko 1,8% ukupne svjetske potrošnje električne energije [2]. Osim što je vidljivo da ukupna instalirana snaga fotonaponskih elektrana neprestano raste, važnije je napomenuti da se u prethodnom razdoblju svake godine povećavala godišnja novoinstalirana snaga. Nastavi li se takav rast prema predviđanjima na kraju 2020. godine ukupna svjetska instalirana snaga fotonaponskih elektrana bi mogla iznositi preko 700 GW [1].

Fotonaponske elektrane, kao i vjetroelektrane, spadaju u skupinu izvora s promjenjivom proizvodnjom koja je uvjetovana trenutnim vremenskim prilikama koje vladaju na mikrolokaciji na kojoj se elektrana nalazi. Osnovni problem kod integracije fotonaponskih elektrana u distribucijski sustav je ovisnost njihove trenutne proizvodnje o trenutnoj osvjetljenosti panela koja se mijenja tijekom dana zbog promjene položaja sunca, ali i zbog zasjenjenja uzrokovanih oblacima ili pojedinim predmetima i objektima. Zbog dnevnih promjena položaja sunca dnevni dijagram proizvodnje izgleda kao zvonolika glatka krivulja koja svoj maksimum postiže u trenucima najjačeg osvjetljenja, ali taj trenutak traje iznimno kratko u odnosu na duljinu dana. Širina te krivulje se mijenja ovisno o godišnjem dobu zbog promjene kuta pod kojim sunčeve zrake padaju na fotonaponske panele. U stvarnosti dnevni dijagram proizvodnje samo manji broj dana u godini ima oblik glatke krivulje dok se češće susreće dijagram s fluktuacijama u proizvodnji uzrokovanih oblacima.

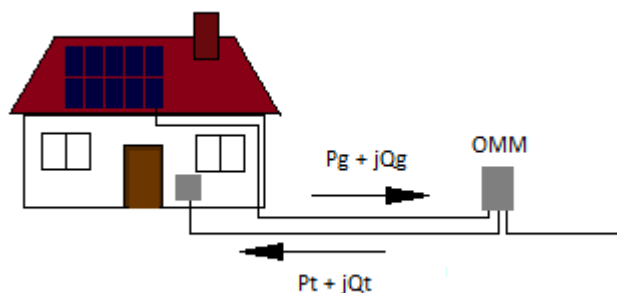
Zbog karakterističnog dnevnog dijagrama proizvodnje fotonaponskih elektrana tijekom dana su mogući periodi u kojima trenutna proizvodnja nadmašuje trenutnu potrošnju što se u mreži očituje kroz poraste napona koji u pojedinim čvorištima mogu dosegnuti i gornju granicu dozvoljenog napona. Da bi se spriječilo narušavanje kvalitete električne energije postavljaju se znatno stroži kriteriji prilikom odobranja priključenja novih elektrana. Upravo ti kriteriji predstavljaju najveće ograničenje za priključenje većeg broja malih fotonaponskih elektrana na distribucijsku mrežu. Najveći porasti napona se uglavnom događaju u trenucima maksimalne dnevne proizvodnje. Stoga se provode mnoga istraživanja na području naponske regulacije kako bi se omogućila integracija većeg udjela fotonaponskih elektrana. Jedna od zastupanih metoda je i ograničavanje radne snage koju elektrane mogu u određenom trenutku isporučivati u niskonaponsku mrežu. Regulacijom radne snage ostvaruje se najveći utjecaj na naponsku regulaciju. U mnogim državama je uvedena ili se uvodi mogućnost ograničavanja isporuke radne snage fotonaponskih elektrana kako bi se u kritičnim periodima održavao napon mreže unutar propisanih granica. Na taj način se odgađa potreba za ulaganjem u pojačanje mreže zbog priključenja novih elektrana na distribucijsku mrežu, a smanjuje se razlika između dijagrama proizvodnje i dijagrama potrošnje.

U ovom članku će se opisati mogućnosti takvog pristupa i iskustva pojedinih država koje su uvele ovakav način naponske regulacije. Najveći problem ovakvog pristupa predstavlja smanjenje profitabilnosti fotonaponskih elektrana budući da im se ograničava količina energije koju mogu isporučiti u mrežu pa je potrebno zauzeti stav treba li se proizvođačima nadoknaditi taj gubitak. Na kraju će se prezentirati optimizacijski postupak kojim se određuje maksimalna radna snaga koju sve razmatrane elektrane mogu predavati u mrežu u određenom trenutku uz uvjet da naponske prilike moraju biti unutar propisanih granica. Za rješenje optimizacijskog problema će se koristiti metaheuristička metoda umjetnih kolonija pčela. Metoda će se testirati na primjeru jedne niskonaponske mreže s velikim udjelom fotonaponskih elektrana te će se prikazati prednosti i nedostaci ovakvog pristupa.

2. NAPONSKA REGULACIJA U NN MREŽAMA S VELIKIM UDJELOM FOTONAPONSKIH ELEKTRANA

2.1. Pregled metoda naponske regulacije

Na slici 1. prikazan je pojednostavljeni kupac s vlastitom proizvodnjom kod kojeg fotonaponska elektrana predaje snagu, potrošnja objekta preuzima snagu, a električno brojilo mjeri razliku te dvije snage.



Slika 1. Pojednostavljeni prikaz tokova snaga kod kupca s vlastitom proizvodnjom

Napon u točki priključenja jednak je zbroju napona mreže i razlike napona koju uzrokuje korisnik s vlastitom proizvodnjom, a računa se prema izrazima (1) i (2), [3]:

$$\Delta U = I(R + jX) = \frac{S^*}{U_{mreža}^*} (R + jX) = \frac{PR + QX}{U_{mreža}^*} + j \frac{PX - QR}{U_{mreža}^*} \quad (1)$$

$$U_{OMM} = U_{mreža} + \frac{PR + QX}{U_{mreža}^*} + j \frac{PX - QR}{U_{mreža}^*} \quad (2)$$

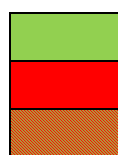
Prema izrazu (2) vidljivo je da se na veličinu napona na mjestu priključenja može utjecati regulacijom napona u mreži, smanjenjem impedancije vodiča ili regulacijom radne i/ili jalove snage na mjestu preuzimanja električne energije. U skladu s tim razvijene su različite metode naponske regulacije u svrhu sprječavanja prenapona uzrokovanih velikim udjelom fotonaponskih elektrana u niskonaponskim mrežama, a najveću učinkovitost trenutno se pokazala kod sljedećih metoda [4]:

- pojačanje mreže,
- ugradnja transformatora SN/NN s automatskom regulacijom,
- upravljanje potrošnjom,
- ugradnja spremnika energije kod kupaca s vlastitom proizvodnjom,
- regulacija jalove snage u izmjenjivaču,
- regulacija radne snage u izmjenjivaču,
- centralizirana regulacija radne snage na mjestu priključenja.

Sve navedene metode su tehnološki razvijene, ali za primjenu pojedinih potrebna je prilagodba važeće regulative. U tablici I. napravljen je pregled tehničke i zakonske primjenjivosti navedenih metoda u pojedinim državama.

Tablica I. Pregled tehničke i zakonske primjenjivosti metoda naponske regulacije u niskonaponskim mrežama s velikim udjelom fotonaponskih elektrana [4]

	Pojačanje mreže	Transformator s automatskom regulacijom	Upravljanje potrošnjom	Spremnici energije	Regulacija jalove snage u izmjenjivaču	Regulacija radne snage u izmjenjivaču	Centralizirana regulacija radne snage na mjestu priključenja
Njemačka							
Španjolska							
Češka							
Italija							



Rješenje je tehnički i zakonski primjenjivo

Rješenje zahtjeva zakonske promjene

Rješenje je tehnički primjenjivo u potpunosti, a zakonski djelomično

Pojačanje mreže je tehnološki najjednostavnija metoda koja podrazumijeva zamjenu postojećih vodiča novima s većim presjekom ili izgradnju novih paralelnih vodiča uz postojeće. Ovakvim pristupom može se značajno utjecati na povećanje kapaciteta mreže za priključenje novih elektrana, a zbog manje impedancije smanjuju se varijacije napona uključujući i padove i poraste. Najveća mana ovog pristupa, ako se koristi isključivo za sprječavanje prenapona, je visoka cijena investicije koja ovisi o karakteristikama mreže [5], a posebno ako se uzme u obzir da se potencijalni prenaponi pojavljuju u iznimno kratkom dijelu vremena tijekom godine [1].

Ugradnjom transformatora SN/NN s automatskom regulacijom razdvaja sekundarni napon postaje neovisan o promjenama primarnog napona, odnosno ograničen je na veličinu mrtve zone regulatora. U teoriji, podešavanjem sekundarnog napona na odgovarajuću veličinu može se značajno utjecati na optimizaciju vođenja niskonaponske mreže u smislu propada napona i prenapona. Međutim, učinkovitost ove metode u praksi značajno može smanjiti slučaj kad proizvodnja nije jednoliko raspoređena po pojedinim niskonaponskim izvodima, pa je potrebno postaviti takvu vrijednost napona sekundara koja će na pojedinim izvodima zadovoljiti padove, na preostalim poraste napona. Najveći nedostatak ove metode je još uvijek izrazito visoka cijena investicije što, kao i kod prethodne metode, može dovesti u pitanje njenu isplativost [1].

Upravljanje potrošnjom podrazumijeva daljinsko uključivanje i isključivanje značajnijih potrošača, kao što su električni bojleri, grijalice, klima uređaji i sl. Smanjivanjem odnosno povećanjem opterećenja u mreži utječe se na povećanje odnosno smanjenje napona. Osnovni problem ove metode je taj što je teško uskladiti stvarne potrebe rada takvih uređaja s trenutnim potrebama u niskonaponskoj mreži [1].

Ugradnja spremnika energije u koje bi se pohranjivala energija koja se ne može isporučiti u mrežu bi za cijeli sustav predstavljala veliki pomak u smislu naponske regulacije, povećanja kapaciteta mreže, ali i povećanja učinkovitosti sustava. Osnovni nedostatak je trenutno visoka cijena i kratak vijek baterija. Budući da je ovo jedna od tehnologija koje se trenutno najbrže razvijaju, u budućnosti će zasigurno imati veliku ulogu u implementaciji fotonaponskih elektrana.

Izmjenjivači fotonaponskih elektrana imaju mogućnost i proizvodnje jalove snage. Budući da je u niskonaponskim mrežama omjer X/R relativno visok, utjecaj jalove snage je znatno manji nego u visokonaponskim mrežama gdje je Q-U regulacija prilično učinkovita. Svejedno, pojedina istraživanja su

pokazala da se u mrežama s velikim udjelom fotonaponskih elektrana i ovom metodom mogu ostvariti značajni učinci na snižavanje napona i povećanje kapaciteta mreže. Jedan od osnovnih nedostataka je taj što je ovakva regulacija omogućena isključivo kao funkcija pojedinog izmjenjivača pa može postojati problem zbog nekoordiniranosti s drugim izmjenjivačima u mreži. Drugi nedostatak je povećanje tokova jalove snage u mreži budući da elektrane moraju raditi u kapacitivnom režimu kako bi snizile napon, a što direktno utječe na povećanje gubitaka u mreži.

2.2. Naponska regulacija upravljanjem radnom snagom fotonaponskih elektrana

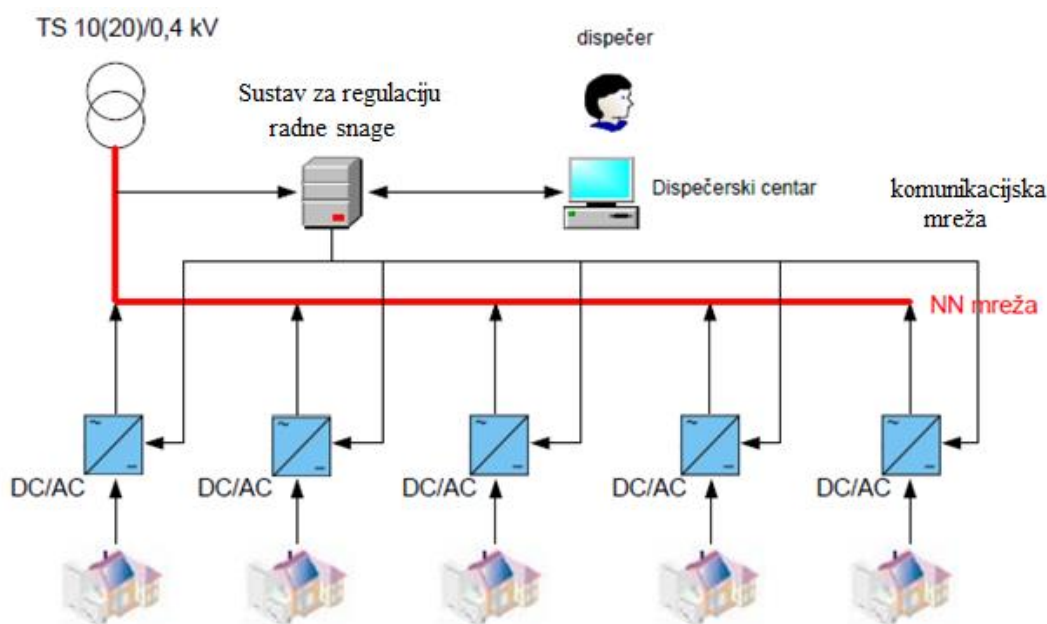
Značajan utjecaj na naponsku regulaciju u niskonaponskim mrežama s velikim udjelom fotonaponskih elektrana može se ostvariti regulacijom radne snage elektrana koja podrazumijeva ograničenje radne snage koja se u određenom trenutku može isporučivati u mrežu. Zbog specifičnog izgleda dnevnog dijagrama proizvodnje, mogućnosti za priključenje fotonaponskih elektrana na niskonaponsku mrežu su prilično ograničene zbog porasta napona. Zbog poticanja razvoja obnovljivih izvora te zbog ekoloških razloga, u gotovo svim državama se morala preuzimati u mrežu sva proizvedena energija iz takvih izvora što je dovelo do porasta cijena električne energije, ali i pojedinih anomalija na tržištu električne energije. Zbog relativno malog udjela takvih izvora u početku se nisu pojavljivali problemi s prenaponima u mreži. Povećanjem udjela fotonaponskih elektrana u mnogim državama su znatno postroženi uvjeti prilikom odobravanja priključenja novih elektrana u smislu proračuna dozvoljenog porasta napona kojeg mogu uzrokovati nove elektrane. Tako u Njemačkoj, Austriji, Švicarskoj, Grčkoj i Češkoj ukupni dozvoljeni porast napona u bilo kojoj točki promatrane mreže ne smije biti veći od 3% za slučaj neopterećene mreže. U Belgiji dozvoljeni porast napona na sekundarnom dijelu priključka iza brojila smije biti 1% i na priključnom kabelu od brojila do mjesta priključenja u mreži također 1% [6]. Takvi kriteriji predstavljaju veliko ograničenje za priključenje većeg broja fotonaponskih elektrana. Stoga su pojedine države uvele i razmatraju uvođenje regulacije aktivne snage fotonaponskih elektrana. U Austriji elektrane nazivne snage veće od 100 kW moraju imati mogućnost ograničenja isporuke radne snage u mrežu. U Njemačkoj već postoje niskonaponske mreže u kojima instalirana snaga fotonaponskih elektrana višestruko premašuje snagu potrošnje te iste mreže. Iz tog razloga uvedeno je da sve elektrane čija nazivna snaga prelazi 100 kW moraju imati mogućnost daljinskog upravljanja radnom snagom te operator distribucijskog sustava mora imati uvid u trenutnu snagu koja se predaje u mrežu. Kod elektrana čija se nazivna snaga nalazi između 30 kW i 100 kW moraju imati samo mogućnost daljinskog upravljanja radnom snagom. Elektrane s nazivnom snagom manjom od 30 kW mogu birati žele li mogućnost daljinskog upravljanja ili fiksno ograničenje snage koja se predaje u mrežu na 70% nazivne snage elektrane [5].

Može se zaključiti da nije moguće značajnije povećati udio instalirane snage fotonaponskih elektrana priključenih na distribucijsku mrežu bez uvođenja određenog oblika regulacije. S obzirom da niskonaponske mreže imaju velik omjer X/R , najveći učinak na naponsku regulaciju može se ostvariti regulacijom ili ograničenjem radne snage. Regulacija radne snage prema razini upravljanja može biti lokalna u izmjenjivaču ili centralizirana s razine TS SN/NN, a prema načinu regulacije može biti statička ili dinamička. Kod statičke regulacije unaprijed je zadana gornja granica snage koju elektrana u svakom trenutku može isporučiti u mrežu. Takva regulacija je uglavnom lokalna i zadaje se u postavkama izmjenjivača. Dinamička regulacija podrazumijeva prilagođavanje maksimalne snage u svakom trenutku ovisno o prilikama u mreži. Kod takve regulacije izuzetno je važan koordiniran rad svih elektrana u razmatranoj mreži pa je razina upravljanja uglavnom centralna. Dinamička regulacija je znatno fleksibilnija te omogućuje predaju veće količine energije u mrežu što povećava učinkovitost cijelog sustava. Međutim, promatrano s razine svake pojedine elektrane, one koje su priključene na slabijim mjestima u mreži imale bi veća ograničenja snage što bi smanjilo njihovu profitabilnost. U tom području postoje pojedina istraživanja koja razrađuju algoritme koji bi umanjili ovakvu neravnotežnost, ali time se direktno smanjuje i ukupna količina energije koja se može predati u mrežu. Dodatna prednost dinamičke centralne regulacije je i dobivanje ujednačenijeg naponskog profila u niskonaponskoj mreži.

Najveći nedostatak naponske regulacije upravljanjem radnom snagom je taj što se dio proizvedene energije mora odbaciti. U istraživanju [7] izračunato je da bi godišnja dobit fotonaponskih elektrana nazivne snage do 10 kW uz statičko ograničenje vršne snage na 70% nazivne snage bila umanjena za 4,4%. U istraživanju [1] izračunato je da bi kod ograničenja gornje granice na 60% količina energije koja se ne može isporučiti tijekom sunčanog dana na dnevnoj razini iznosila svega 5%. Također je potrebno napomenuti da u državama u kojima je dozvoljeno ograničavanje radne snage operator distribucijskog sustava mora isplatiti proizvođačima naknadu za proizvedenu neisporučenu energiju. Jedno od rješenja za izbjegavanje odbacivanja proizvedene energije je kombiniranje ograničenja radne

snage sa baterijskim spremnicima. U Njemačkoj država daje poticaj u iznosu od 30% za ugradnju baterija, ali uz uvjet da gornja granica snage koja se predaje u mrežu bude 60% nazivne snage elektrane [3].

Tema ovog članka je izrada algoritma za izračun maksimalne snage koju svaka pojedina elektrana može predavati u određenom trenutku u mrežu uz uvjet da su naponi u svim točkama niži od zadane gornje granice. Za optimizacijski postupak je korištena metoda umjetnih kolonija pčela. Takav način upravljanja predstavlja dinamičko centralizirano upravljanje s razine TS SN/NN, a koncept rješenja je prikazan na slici 2.



Slika 2. Koncept sustava za centralni nadzor i regulaciju radne snage fotonaponskih elektrana [8]

3. OPTIMIZACIJSKI MODEL NAPONSKE REGULACIJE METODOM UMJETNIH KOLONIJA PČELA

3.1. Metoda umjetnih kolonija pčela

Metoda umjetnih kolonija pčela je metaheuristička matematička metoda za rješavanje višedimenzionalnih i multimodalnih optimizacijskih problema koja se zasniva na simulaciji ponašanja pčelinjeg roja u procesu prikupljanja hrane. Metodu je razvio Dervis Karaboga 2005. godine.

Pčelinji roj u prirodi se sastoji od matica, trutova i pčela radilica. U procesu prikupljanja hrane sudjeluju samo pčele radilice koje su podijeljene na izviđače, promatrače i sakupljače. Zadatak izviđača je nasumično pretraživanje okoline u potrazi za izvorima hrane, a po povratku u košnicu izvode pčelinji ples kojim prenose informaciju o kvaliteti pojedinog izvora. Na kvalitetu izvora utječu udaljenost od košnice, količina nektara i potrebna energija za prikupljanje nektara. Na ulazu u košnicu dočekuju ih promatrači koji prema pčelinjem plesu ocjenjuju kvalitetu izvora hrane te informaciju prenose sakupljačima koji potom odlaze i prikupljaju hranu.

U matematičkoj metodi ukupan broj pčela N predstavlja veličinu populacije. Pozicije izvora hrane predstavljaju potencijalna rješenja problema, a količina nektara predstavlja kvalitetu rješenja. Prilikom inicijalizacije metode, polovicu populacije čine sakupljači, a drugu polovicu promatrači. Optimizacijski postupak se odvija u tri faze:

1. Faza sakupljača
2. Faza promatrača
3. Faza izviđača

Postupak se ciklički ponavlja do unaprijed zadanog broja ciklusa $C_{\max}$. Prije početka prve faze potrebno je napraviti inicijalizaciju metode. Svaki od sakupljača odlazi na jedan nasumično odabrani izvor, odnosno nasumično se odabire jedno rješenje u zadanom rasponu. Potencijalno rješenje x_i predstavlja D-dimenzionalni vektor gdje je D jednak broju parametara koji se optimiziraju. Inicijalna nasumična rješenja se generiraju prema izrazu (3) [9]:

$$x_{ij} = x_{\min j} + \text{random}(0,1) \cdot (x_{\max j} - x_{\min j}) \quad , \quad i = 1, \dots, N/2 ; j = 1, \dots, D \quad (3)$$

Faza sakupljača

U fazi sakupljača svaka pčela treba istražiti okolinu inicijalno generiranog izvora kako bi eventualno pronašla bolji izvor, odnosno rješenje. Taj postupak se simulira na način da se nasumično odaberu vrijednosti j i k , a potom se prema izrazu (4) generira novo rješenje v_{ij} u okolini rješenja x_{ij} :

$$v_{ij} = x_{ij} + \text{random}(-1,1) \cdot (x_{ij} - x_{kj}) \quad , \quad j \in \{1, \dots, D\}; k \in \{1, \dots, N/2\}; k \neq i \quad (4)$$

Potom se za oba rješenja x_{ij} i v_{ij} računa funkcija dobrote (5) (*eng. Fitness function*) kojom se mjeri kvaliteta rješenja:

$$Fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i} & , \quad f_i \geq 0 \\ 1 + |f_i| & , \quad f_i \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

gdje f_i predstavlja funkciju cilja.

Primjenom pohlepne metode uspoređuje se kvaliteta oba rješenja te se pamti samo bolje od njih. Postupak istraživanja u okolini pojedinog rješenja se provodi maksimalno do zadanog broja pokušaja. Ako se u tim pokušajima ne pronađe bolje rješenje, pčela napušta izvor te postaje izviđač [10].

Faza promatrača

Pčele promatrači imaju zadatak ocijeniti kvalitetu pojedinih rješenja. Za ocjenu kvalitete koristi se funkcija dobrote pomoću koje se računa vjerojatnost svakog rješenja p_i (6):

$$p_i = \frac{Fit_i}{\sum_{n=1}^N Fit_n} \quad (6)$$

U ovoj fazi se pohlepnom metodom odabiru najbolja potencijalna rješenja. Potom promatrači postaju sakupljači te istražuju okolinu potencijalnih rješenja prema izrazu (4). Postupak istraživanja okoline se ponavlja ili do pronalaska boljeg rješenja ili do zadanog maksimalnog broja pokušaja [11].

Faza izviđača

Faza izviđača nastupa kad se u potrazi za boljim rješenjem u okolini određenog izvora ne pronađe bolje rješenje u zadanom broju pokušaja. U tom slučaju izvor se napušta, a pčela postaje izviđač te je potrebno generirati potpuno novo nasumično rješenje prema izrazu (3).

Istraživanjem okoline rješenja i fazom izviđača ova matematička metoda vrlo uspješno izbjegava zapadanje u lokalne ekstreme što ju čini vrlo učinkovitom za rješavanje i najsloženijih optimizacijskih problema. Osnovni nedostatak je, kao i kod svih heurističkih i metaheurističkih algoritama, duljina trajanja proračuna koja ovisi o veličini problema te inicijalnim postavkama (veličina populacije, broj ciklusa, broj pokušaja i željena točnost).

3.2. Primjena metode za optimizaciju naponske regulacije u niskonaponskim mrežama s velikim udjelom fotonaponskih elektrana

Ideja ovog članka je izraditi optimizacijski model kojim bi se računale maksimalne snage svih pojedinih fotonaponskih elektrana u razmatranoj mreži u određenom trenutku uz uvjet da naponi u svim čvorištima budu ispod zadane gornje granice. Ovakvim pristupom se zapravo želi izračunati ukupna maksimalna snaga koju elektrane mogu u tom trenutku predavati u mrežu. Ranije je navedeno da pojedine države već dozvoljavaju određene oblike regulacije radne snage, ali zasada operatori distribucijskog sustava moraju isplatiti odštetu proizvođačima za proizvedenu neisporučenu energiju. U tom slučaju primjenom predloženog pristupa operator distribucijskog sustava bi imao korist jer bi minimizirao količinu proizvedene neisporučene energije, a samim time i njen trošak kojeg mora isplatiti proizvođačima. Ako bi, kojim slučajem bila dozvoljena regulacija radne snage fotonaponskih elektrana bez mogućnosti nadoknade štete, od ovakvog pristupa bi korist imali proizvođači jer bi im se omogućila isporuka maksimalne snage u mrežu s obzirom na tehničke mogućnosti mreže.

Funkcija cilja optimizacijskog problema je maksimalna snaga koja se može predavati u mrežu u promatranom trenutku (7):

$$FUNKCIJA\ CILJA = \max \sum_{i=1}^D P_i \quad (7)$$

gdje su:

D – broj fotonaponskih elektrana u razmatranoj mreži,

P_i – radna snaga koju elektrana i predaje u mrežu.

Osim funkcije cilja u postupku je potrebno zadati i početne uvjete. Prvi uvjet je da snaga P_i mora biti između najmanje dozvoljene snage $P_{\min i}$ i maksimalne snage $P_{\max i}$ koju elektrana i može isporučiti u promatranom trenutku u mrežu (8):

$$P_{\min i} \leq P_i \leq P_{\max i} \quad , \quad i = 1, \dots, D \quad (8)$$

Drugi uvjet je da naponi u svim čvorištima moraju biti unutar propisanih granica (9):

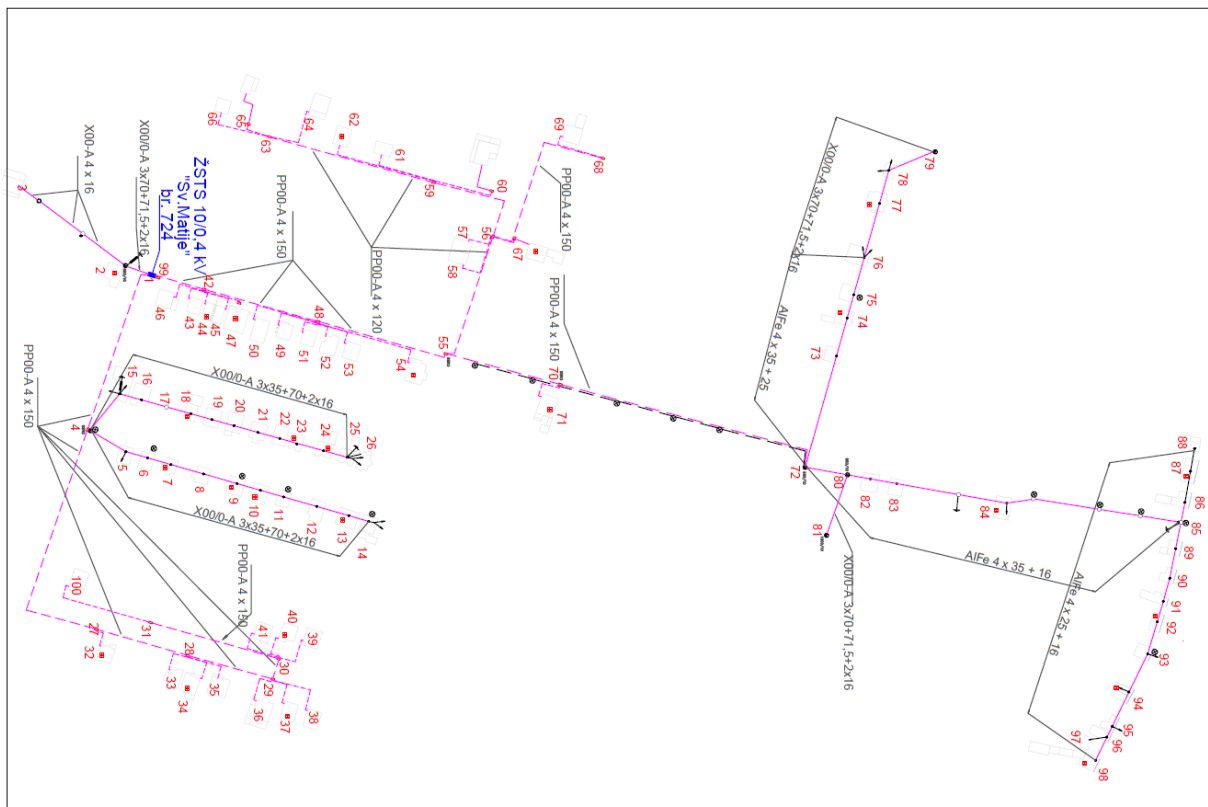
$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad , \quad i = 1, \dots, m \quad (9)$$

gdje je m ukupan broj čvorišta u razmatranoj mreži.

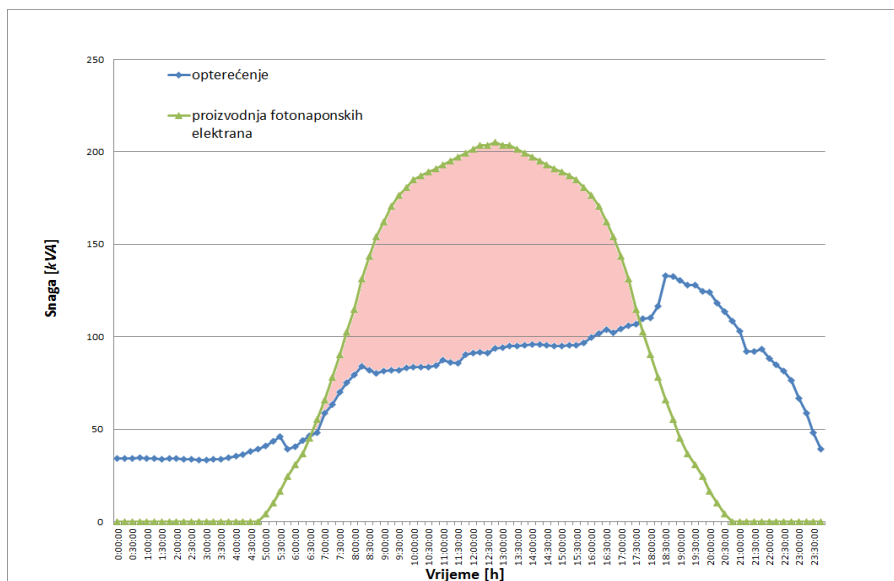
Prema navedenim postavkama optimizacijski model je izrađen u programskom jeziku Matlab R2017a. Fotonaponske elektrane i potrošači su modelirani kao P-Q čvorišta, a cijeli optimizacija se provodi na trofaznom modelu budući da su u niskonaponskoj mreži česta nesimetrična opterećenja. Proizvodnja elektrana s trofaznim priključkom uvijek mora biti simetrična.

Model je testiran na primjeru stvarne niskonaponske mreže iz TS 10(20)/0,4 kV sv. Matije u Sibinju na području Elektre Slavonski Brod sa 100 čvorišta (slika 3.), a na koju su priključena 82 potrošača. Za potrebe simulacije pretpostavljeno je da je na mrežu priključeno 25 fotonaponskih elektrana ukupne priključne snage 205,4 kVA. Izmjereno maksimalno opterećenje u mreži iznosi 133,01 kVA, a minimalno 33,62 kVA tijekom noćnog razdoblja. Na slici 4. prikazani su dnevni dijagram opterećenja te dnevni dijagram proizvodnje svih elektrana u slučaju ljetnog sunčanog dana. Najveći porast napona u mreži se očekuje u trenutku kad razlika trenutne proizvodnje i trenutne potrošnje u mreži bude najveća u korist proizvodnje. U promatranom primjeru taj trenutak je u 13:30 h te je isti odabran za analizu modela. Postavke optimizacijskog modela su:

veličina populacije:	10	donja granica proizvodnje:	0
broj ciklusa:	5000	gornja granica proizvodnje:	Pmax
broj pokušaja:	10	donja granica napona:	207 V
		gornja granica napona:	253 V

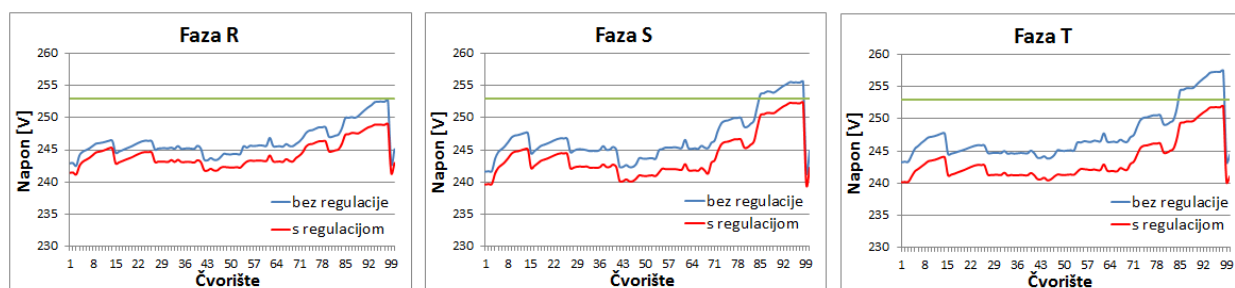


Slika 3. NN mreža iz TS 10(20)/0,4 kV sv. Matije u Sibinju na području Elektre Slavonski Brod [12]



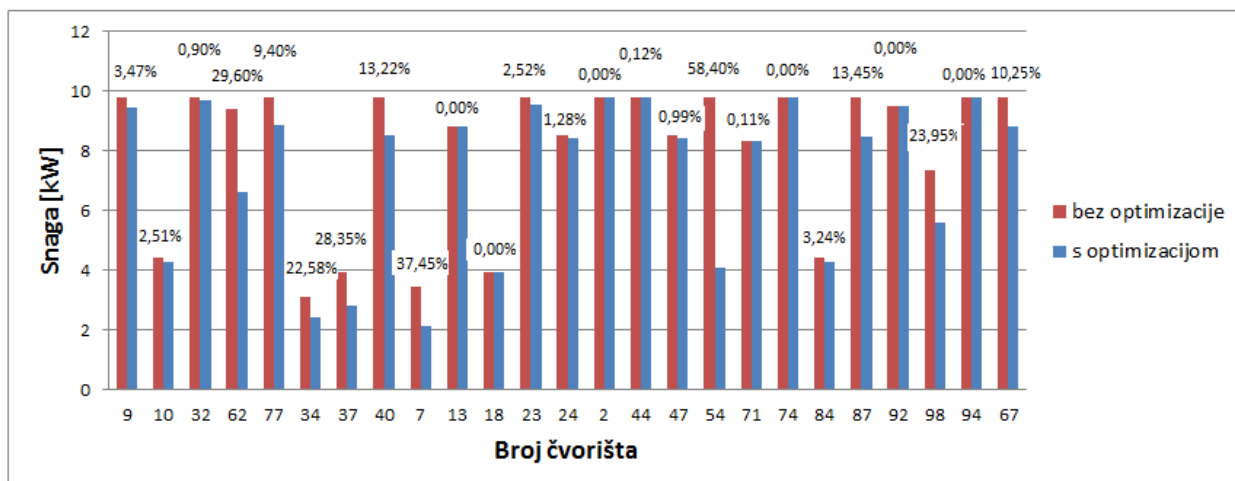
Slika 4. Usporedba dnevnog dijagrama ukupnog opterećenja i ukupne proizvodnje fotonaponskih elektrana u razmatranoj mreži [12]

Na slici 5. prikazani su dijagrami naponskih profila po fazama u promatranom trenutku u slučaju bez regulacije radne snage i uz zanemarene prorade prenaponskih zaštita te u slučaju primjene predloženog optimizacijskog postupka. Vidljivo je da bi bez ograničenja radne snage naponi u čvorištima od 85 do 98 bili veći od dozvoljenih 253 V u fazama S i T te bi prenaponska zaštita odvojila od mreže elektrane u čvorištima 87, 92, 94 i 98. Primjenom optimizacijskog postupka izvršeno je ograničenje radne snage pojedinih elektrana te su naponi u svim točkama u sve tri faze ispod gornje dozvoljene granice.



Slika 5. Usporedba napona po fazama u svim čvorištima u slučaju bez i sa regulacijom radne snage

Na slici 6. prikazan je dijagram usporedbe maksimalnih i optimalnih snaga proizvodnje u promatranom trenutku za svaku elektranu, a iznad je naveden postotak smanjenja radne snage. Vidljivo je da kod većeg dijela elektrana nema značajnijeg ograničenja, dok kod manjeg dijela postoji umjereno ograničenje, osim za elektranu u čvorištu 54 gdje bi ograničenje iznosilo 58,40%. Ukupna maksimalna snaga proizvodnje u promatranom trenutku je iznosila 201,29 kW, a optimalna 182,24 kW što daje ukupno ograničenje od 9,47%.



Slika 6. Usporedba maksimalnih i optimalnih snaga fotonaponskih elektrana u promatranom trenutku

4. ZAKLJUČAK

U ovom članku opisane su vrste naponske regulacije u mrežama s velikim udjelom fotonaponskih elektrana te je naglašena nužnost njihove primjene u svrhu povećanja kapaciteta mreže za priključenje veće instalirane snage elektrana, ali i u svrhu održavanja propisanih uvjeta kvalitete električne energije u mreži. Pojačanjem mrežne infrastrukture može se utjecati na smanjenje naponskih fluktuacija tijekom dana, ali to iziskuje značajna ulaganja, a učinak takvih metoda je ograničen. Primjenom metoda regulacije radne i/ili jalove snage može se postići veći učinak, ali to rezultira ograničenjem isporuke proizvedene energije u mrežu. Svrha ovog članka je bila izraditi optimizacijski model za upravljanje radnom snagom elektrana na način da se u svakom trenutku računaju optimalne snage koju elektrane mogu predavati u mrežu, a da naponi u svim čvorištima mreže ostanu ispod gornje propisane granice. Na analiziranom primjeru pokazalo se da je metoda učinkovita. Iako se takvim pristupom dio proizvedene energije odbacuje, gledajući u širem kontekstu, omogućuje se priključenje veće instalirane snage elektrana bez ulaganja u pojačanje mrežne infrastrukture. Nedostatak ovakvog pristupa je narušavanje načela pravednosti budući da elektrane koje se nalaze na povoljnijim mjestima u mreži imaju manja ograničenja. S obzirom na brzinu razvoja baterijskih spremnika, u skoroj budućnosti se može očekivati

pad njihove cijene, a samim time ovakav pristup u kombinaciji sa skladištenjem energije bi dobio na značaju. Važno je napomenuti da, ako se u budućnosti planira značajno povećanje udjela fotonaponskih elektrana, to će biti tehnički moguće ostvariti jedino uz primjenu jednog ili više od navedenih pristupa naponske regulacije, a odabir pristupa će ovisiti o tehničkim karakteristikama mreže i veličini potrebnih ulaganja.

LITERATURA

- [1] S. Hashemi, J. Østergaard :“Methods and Strategies for Overvoltage Prevention in Low Voltage Distribution Systems with PV“, IET Renewable Power Generation, vol. 11, Issue 2, pp. 205-214, 24. travanj 2017.
- [2] <https://www.greentechmedia.com/articles/read/iea-global-installed-pv-capacity-leaps-to-303-gw#gs.FT9Rx7s> (20.01.2018.)
- [3] M. Resch, B. Ramadhani, J. Bühler, A. Sumper :“Comparison of control strategies of residential PV storage systems“, 9th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2015), Messe Düsseldorf, 9.-11. ožujak 2015.
- [4] „PV GRID – Final project report“, kolovoz 2014.
- [5] F. Carigiet, M. Niedrist, C. Scheuermann, F. Baumgartner :“Case study of a low-voltage distribution grid with high PV penetration in Germany and simulation analyses of cost-effective measures“, 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, rujan 2015.
- [6] “High penetration of PV in local distribution grid – Subtask 2: Case-study collection“, IEA International Energy Agency, 2014.
- [7] F. Carigiet, grupa autora: „Verification of measured PV energy yield versus forecast and loss analysis“, 28th EUPVSEC, Paris, Listopad 2013.
- [8] T. Alinjak, I. Pavić, D. Jakšić :“Model solarne elektrane u proračunima tokova snaga“, 3.(9.) savjetovanje HO CIRED 2012, Sveti Martin na Muri, Hrvatska, 13.-16.05.2012., SO4-13
- [9] D. Klemen :“Raspoznavanje uzoraka primjenom umjetne kolonije pčela“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Diplomski rad br. 188, Zagreb, lipanj 2011.
- [10] E. Gerhardt, H. Martins Gomes :“Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Engineering Optimization Problems“, EngOpt 2012 – 3rd International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 01 - 05 July 2012.
- [11] D. Karaboga, B. Basturk :“A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm“, Journal of Global Optimization, Volume 39, Issue 3, pp. 459–471, November 2007.
- [12] T. Alinjak :“Minimizacija gubitaka snage u distribucijskoj mreži sa značajnim udjelom fotonaponskih elektrana primjenom metode umjetnih kolonija pčela“, doktorski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2018.