

Optimalno angažovanje elektrana u elektroenergetskom sistemu sa obnovljivim izvorima energije

Dimitrije Kotur, Pavle Dakić, Željko Đurišić

Katedra za elektroenergetske sisteme
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet,
Beograd, Srbija
kotur@etf.rs
dakicpavle@gmail.com
djurisic@etf.rs

Sažetak — Sa pojavom obnovljivih izvora energije (OIE), neto dijagrami snaga potrošačkih čvorova mogu se značajno promeniti. Razlog promene je intermitentna priroda OIE. U ovom radu, analiziraju se promene koje OIE unose u optimalnu preraspodelu snaga angažovanja elektrana. Analize se obavljaju na intervalu od 24 sata, pri čemu se u obzir uzima i prostorna i vremenska koordinacija termoelektranama, akumulacionim hidroelektranama, kao i sistemima za skladištenje energije. Kriterijumi optimizacije su minimalni dnevni gubici energije i minimalni dnevni pogonski troškovi. Kao test mreža uzeta je 220 kV i 400 kV prenosna mreža Srbije. Dijagrami proizvodnje iz solarnih i vetroelektrana su realni. Rezultati analiza i simulacija dobijenih u ovom radu omogućavaju bolji uvid u promene koje OIE unose u optimalnu prostornu i vremensku koordinaciju angažovanja različitih tipova elektrana u sistemu.

Ključne reči – obnovljivi izvori energije; optimalno angažovanje agregata; minimum gubitaka energije; minimum pogonskih troškova

I. UVOD

Optimalni tokovi snaga (OPF) su oduvek bili aktuelna tema istraživanja u EES-u. OPF pre svega ima za cilj određivanje preraspodele snaga svih agregata u jednom sistemu sa ciljem postizanja optimalnog stanja. Optimalno stanje se uglavnom definiše preko minimalnih gubitaka ili minimalnih troškova, a proračunava se za jedan vremenski trenutak [1]. Obzirom da se oblik dijagrama potrošnje u konvencionalnom EES-u u toku jedne sezone vrlo malo menja, operatoru sistema nije potrebno mnogo vremena da stekne iskustvo o tome na koji način treba optimalno vršiti angažovanje agregata, uvažavajući sezonske meteorološke i druge uticaje na potrošnju i hidrologiju. Sa pojavom OIE, dolazi do promena u upravljanju sistemom, što obuhvata i optimalno angažovanje agregata. Naime, kako je priroda OIE intermitentna, njihovom integracijom u EES i čitav sistem postaje intermitentan. Zbog toga su promene strategije po kojoj se vrši optimalna preraspodela snage po aggregatima u sistemu neophodne [2].

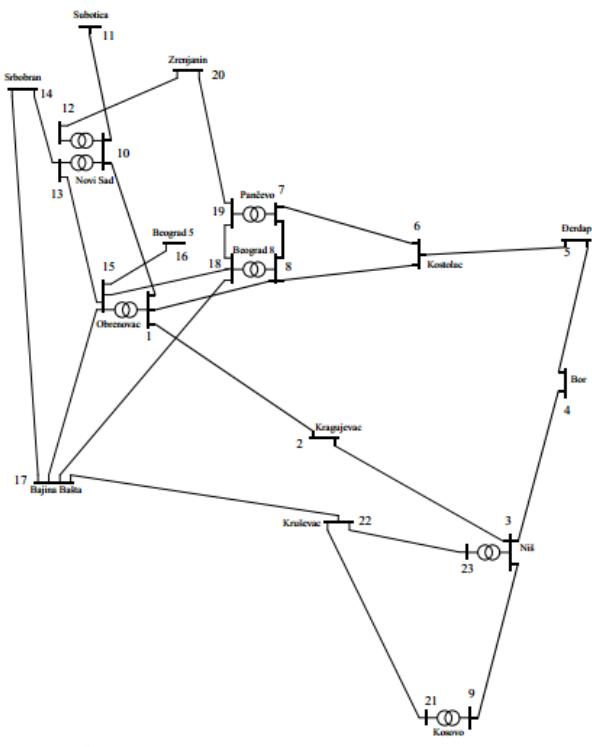
U literaturi [3] izvršena je analiza OPF-a u sistemu sa i bez OIE za jedno stanje. Na to se nastavlja rad [4] u kome se OPF proširuje na vremenski interval od od 24h. U okviru [5] izvršena je analiza uticaja vetroelektrana na optimalno angažovanje termoelektrana u istočnoj i srednjoj Evropi. Intermitentna uloga vetroelektrana u proračunu OPF-a je analizirana u okviru literature [6]. Uticaj sistema za skladištenje energije na optimalnu integraciju OIE u sistem, kao i optimalno angažovanje agregata analizirano je u [7].

U ovom radu, uticaj OIE na optimalnu preraspodelu snage elektrana je analiziran kroz dva scenarija. U prvom scenariju je pretpostavljeno da u sistemu nema instalisanih kapaciteta OIE. U drugom scenariju je analiziran sistem sa određenim instalisanim kapacitetima OIE. Za razliku od istraživanja u postojećoj literaturi, u ovom radu optimalna preraspodela snaga elektrana je analizirana na nivou od 24 sata, čime se u obzir uzima i prostorna i vremenska koordinacija upravljanja termoelektranama, akumulacionim hidroelektranama kao i revirzibilnim i pumpno-akumulacionim hidroelektranama. Optimizacija je vršena po dve kriterijumske funkcije, minimum dnevnih gubitaka energije i minimum dnevnih pogonskih troškova. Prenosna 220kV i 400 kV mreža Srbije je korišćena kao test mreža. Podaci korišćeni u radu su formirani tako da što je moguće više odgovaraju realnoj situaciji. Za rešavanje svih optimizacionih problema korišćen je genetski algoritam (GA) [8].

II. DEFINICIJA OPTIMIZACIONOG PROBLEMA

A. Podaci o analiziranom EES-u

U radu je korišćena 220 kV i 400 kV mreža Srbije prikazana na Sl. 1. Parametri mreže prikazani su u [9]. Za baznu vrednost snage usvojeno je $S_b=100$ MVA, a napona $Ub=400$ kV. Mreža se sastoji od 23 čvora, od kojih je 6 generatorskih i 17 potrošačkih.

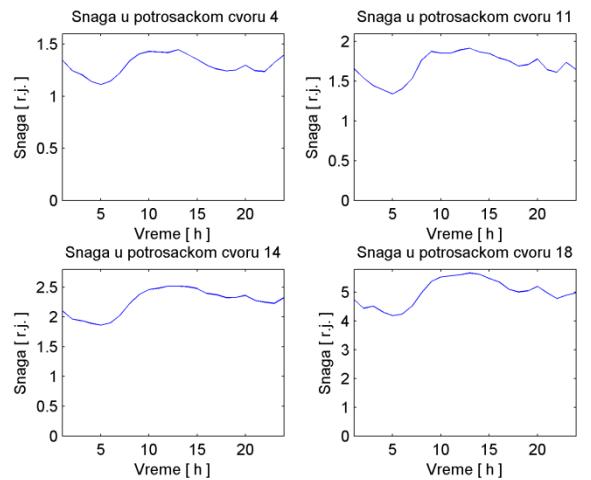


Slika 1. Mreža Srbije naponskog nivoa 400kV i 220kV

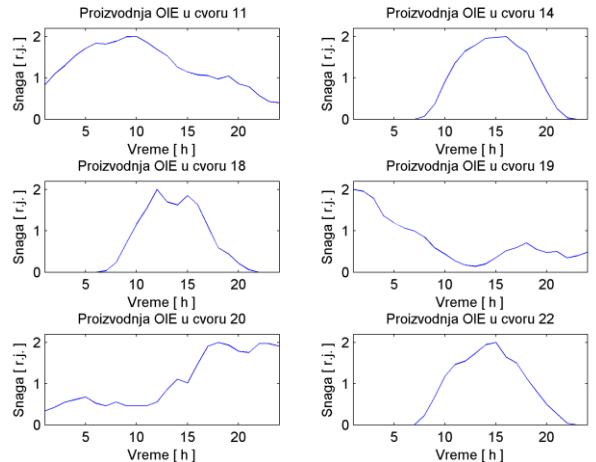
U tabeli 1 su prikazani podaci o vršnim opterećenjima potrošačkih čvorova, dok je na Sl. 2. prikazan primer dijagrama potrošnje za četiri proizvoljna čvora. Na Sl. 3. prikazana je snaga proizvodnje iz vetroelektrana i solarnih elektrana. Pretpostavljeno je da potrošači rade sa istim faktorom snage 0,95.

TABELA I. VRŠNE SNAGE POTROŠAČKIH ČVOROVA

Čvor	Aktivna snaga (r.j.)	Čvor	Aktivna snaga (r.j.)
2.	1,08	13.	1,242
3.	0,468	14.	2,4
4.	1,377	16.	5,586
7.	0,24	18.	5,4
8.	0	19.	1,67
9.	1,08	20.	1,305
10.	0,91	22.	2,14
11.	1,825	23.	0
12.	0,783		



Slika 2. Primer dijagrama snage u četiri proizvoljna potrošačka čvora



Slika 3. Proizvodnja iz OIE

Ostalo je još definisati pogonske troškove svih elektrana. Za akumulacionu i pumpno-akumulacionu hidroelektranu se uzima da su pogonski troškovi 0. Odavde se može doći do zaključka da u slučaju minimuma pogonskih troškova treba koristiti samo hidroelektrane. Taj zaključak je pogrešan, pre svega zbog toga što nije uzeto u obzir da hidroelektrane energiju mogu proizvoditi dok imaju raspoložive resurse vode. Kod akumulacionih hidroelektrana se uzima da se ravnanje vode vrši na dnevnom nivou, pa je u radu usvojeno da je njen raspoloživi dnevni kapacitet proizvodnje električne energije 70 r.j. Kod pumpno-akumulacione hidroelektrane se usvaja da se sva raspoloživa energija vodenog toka mora ranije pumpati iz donje vode dok elektrana radi u potrošačkom režimu, odnosno da je neto proizvedena energija elektrane jednaka nuli.

Za termoelektrane su usvojeni sledeći koeficijenti pogonskih troškova, svedeni na relativne jedinice [10]:

- TE Obrenovac: $a=1170$ NJ; $b=3770$ NJ ; $c=82$ NJ
- TE Kostolac: $a=600$ NJ; $b=4110$ NJ; $c=227$ NJ
- TE Kosovo: $a=1075$ NJ; $b=3810$ NJ; $c=86$ NJ

B. Matematička definicija problema

Svaki optimizacioni problem, pa i problem optimalne preraspodele snage agregata, može se formalno matematički napisati u sledećem obliku:

$$\min f(x) \quad (1)$$

$$g(x) = 0 \quad (2)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (3)$$

Sve tri jednačine predstavljaju zavisnosti od vektora promenljivih x . Elementi vektora x mogu se podeliti na nezavisno promenljive ili upravljačke, i zavisno promenljive veličine. Upravljačke veličine predstavljaju napone i snage generisanja u generatorskim čvorovima. U zavisno promenljive veličine spadaju naponi potrošačkih čvorova, kao i uglovi svih čvorova sem referentno – balansnog. Pod pretpostavkom da sistem ukupno ima n čvorova, od čega m generatorskih, ovaj vektor se može napisati u sledećem obliku:

$$x = [P_{gen} \quad U_{1Xn} \quad \theta_{1X(n-1)}]^T \quad (4)$$

U jednačini (1) definisana je objektivna funkcija. U ovom radu, analizirane su dve objektivne funkcije, minimum dnevnih gubitaka energije i minimum dnevnih pogonskih troškova. Obe objektivne funkcije se mogu napisati u sledećem obliku:

$$\min W_{gub} = \min \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

$$\min C_{ene} = \min \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^m (a_i + b_i \cdot P_i + c_i \cdot P_i^2) \quad (6)$$

Jednačina (5) predstavlja matematički zapis objektivne funkcije minimuma dnevnih gubitaka energije. Činjenica da se gubici energije u sistemu mogu dobiti kao zbir injektiranja svih snaga je iskorišćena za matematičku formulaciju ovog problema. Jednačina (6) predstavlja minimalne dnevne pogonske troškove. U obe jednačine se pojavljuju dve sume. Prva suma predstavlja sumu satnih vrednosti objektivne funkcije za svaki od 24 sata, dok druga suma obuhvata analizirane čvorove sistema.

Jednačina (2) predstavlja skup ograničenja tipa jednakosti. U analiziranom problemu, ograničenja tipa jednakosti predstavljaju jednačine tokova snaga koje uvek moraju biti zadovoljene:

$$P_{t,i}^{inj} = \sum_{k=1}^n U_{t,k} U_{t,i} (G_{i,k} \cos(\theta_{t,ik}) + B_{i,k} \sin(\theta_{t,ik})) \quad (7)$$

$$Q_{t,i}^{inj} = \sum_{k=1}^n U_{t,k} U_{t,i} (G_{i,k} \sin(\theta_{t,ik}) - B_{i,k} \cos(\theta_{t,ik})) \quad (8)$$

U ovim jednačinama su: $P_{t,i}^{inj}$ i $Q_{t,i}^{inj}$ - snage injektiranja u čvoru i u satu t ; $U_{t,k}$ - vrednost napona u čvoru k u satu t ; $G_{i,k}$ i $B_{i,k}$ - elementi matrice admitansi čvorova mreže; $\theta_{t,ik}$ - razlika uglova u čvorovima i i k u satu t .

Jednačina (3) obuhvata ograničenja tipa nejednakosti. Glavna ograničenja tipa nejednakosti su vezana za minimalne i

maksimalne snage elektrana, kao i minimalne i maksimalne napone u mreži. To se može zapisati u sledećem obliku:

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad (10)$$

$$U_i^{min} \leq U_i \leq U_i^{max} \quad (11)$$

U jednačini (10) P_i predstavlja snagu i -te elektrane, pri čemu je $i = 1, \dots, m$. U jednačini (11) U_i predstavlja napon u i -tom čvoru, pri čemu i uzima vrednosti $i = 1, \dots, n$. U tabeli 2 prikazane su vrednosti za minimalne i maksimalne snage svake od elektrana. Treba napomenuti da se usvaja da hidroelektrane rade sa više turbina, odnosno pumpi, te se zbog toga uzima da je njihova minimalna snaga jednaka 0.

U radu se pojavljuju još dva ograničenja tipa nejednakosti. To su ograničenja o ukupnoj proizvedenoj energiji hidroelektrana. Naime, kao što je već ranije napomenuto, ukupna raspoloživa energija akumulacione hidroelektrane je 70 r.j. dok pumpno-akumulaciona elektrana ne može da koristi u toku dana više vode nego što je napumpala. Oba ova ograničenja se mogu napisati u sledećem obliku:

$$\sum_{t=1}^{24} P_t \leq Const \quad (9)$$

U slučaju akumulacione hidroelektrane, ova konstanta iznosi 70 r.j. dok u slučaju pumpno-akumulacione hidroelektrane njena vrednost je 0. U slučaju akumulacione hidroelektrane, ova konstanta označava ukupnu raspoloživu energiju vode. U slučaju pumpno-akumulacione hidroelektrane, vrednost konstante 0 označava da ukupna dnevna energija elektrane u generatorskom režimu mora biti veća od ukupne dnevne energije elektrane kada radi u pumpnom režimu. U ovoj analizi su zanemareni gubici pri transformaciji potencijalne energije vode pri punjenju i pražnjenju akumulacionog jezera pumpno – akumulacione hidroelektrane.

TABELA II. PODACI O MINIMALNIM I MAKSIMALNIM SNAGAMA ELEKTRANA

Čvor	Tip elektrane	P_{min} (r.j.)	P_{max} (r.j.)
1.	termoelektrana	Slack	Slack
5.	akumulaciona hidroelektrana	0	8
6.	termoelektrana	1.4	2
15.	termoelektrana	2.8	4
17.	pumpno-akumulaciona hidroelektrana	-5	5
21.	termoelektrana	6	9

III. REŠENJE OPTIMIZACIONOG PROBLEMA

Zadati optimizacioni problem je u ovom radu rešavan primenom genetskog algoritma (GA). U ovom odeljku prikazan je kratak opis ovog algoritma i njegova primena u rešavanju datog optimizacionog problema.

A. Genetski algoritam

Genetski algoritam (GA) spada u grupu evolutivnih algoritama koji prema uređenom principu vrši pretragu optimalnog rešenja. GA oponaša teoriju evolucije. U prirodi, prilikom razmnožavanja, roditelji svoj genetski sadržaj prenose na svoje potomke. Tom prilikom, deca ukrštanjem roditeljskih gena mogu preuzeti više ili manje dobrih osobina. Tako se može desiti da jedno dete preuzeće sve loše osobine, dok drugo sve dobre. Prema teoriji evolucije, u prirodi preživljavaju uglavnom jake jedinke, dok slabe izumiru i pre nego što dođu u priliku da se razmnožavaju. Zbog toga, u prirodi opstaju samo jake jedinke koje svoje dobre gene prenose na svoje potopke, čime i čitava populacija vremenom postaje sve bolja.

Ovaj princip koristi i GA. U implementaciji GA neophodno je prvo definisati jedinke koje će činiti populaciju. Svaka jedinka predstavlja mogući skup upravljačkih promenljivih za koje tražimo minimalnu vrednost objektivne funkcije. Jačina, odnosno kvalitet jedinke, meri se upravo kroz vrednost njene objektivne funkcije. U slučaju da se traži minimalna vrednost funkcije, manja vrednost označava jaču jedinku:

$$1: x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1 \rightarrow f(x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1) \quad (10)$$

⋮

$$N: x_1^N, x_2^N, \dots, x_n^N \rightarrow f(x_1^N, x_2^N, \dots, x_n^N) \quad (11)$$

U radu je korišćen GA binarnog tipa, što znači da se u njemu vrši šifrovanje promenljivih uz pomoć binarnog koda. Obzirom da svaka promenljiva uzima vrednost između x_i^{min} i x_i^{max} sa korakom Δx_i , to se svaka vrednost promenljive na jedinstven način šifruje sledećim izrazom:

$$X_i = dec2bin\left(\frac{x_i - x_i^{min}}{\Delta x_i}\right) \quad (12)$$

U ovom izrazu, *dec2bin* predstavlja konverziju odgovarajućeg decimalnog broja u binarni. Nakon formiranja početne populacije, vrši se sortiranje rešenja od najboljeg do nalošijeg, nakon čega GA ulazi u iterativni proces. Iterativni proces predstavlja simulaciju prirodne pojave formiranja novih generacija.

U iterativnom procesu, prva operacija naziva se elitizam. Cilj elitizma je da sačuva određeni broj najboljih jedinki od izumiranja. Naime, prilikom ukrštanja genetskog sadržaja može se dogoditi da najbolja jedinka naredne generacije bude lošija od najbolje u prethodnoj. Zbog toga se određeni procenat najboljih jedinki direktno prepisuje u narednu generaciju, čime se čuva njihov genetski sadržaj.

Ostatak jedinki se formira ukrštanjem. U prirodi, prilikom razmnožavanja dve jedinke prenose svoj genetski materijal

svom detetu. Upravo to se radi i prilikom ukrštanja u GA. Naime, neophodno je prvo izabrati jedinke koje će učestvovati u ukrštanju. U ovom radu, to je učinjeno po principu turnira. Prvo se na slučajan način biraju 4 jedinke. Nakon toga, održavaju se dva „turnira“ u kojima se u prvom slučaju upoređuju objektivne funkcije prve i druge jedinke, dok se u drugom upoređuju objektivne funkcije treće i četvrte jedinke. U svakom turniru pobednica je jedinka koja ima manju vrednost objektivne funkcije. Kada su izabrane pobednice turnira, dolazi do njihovog ukrštanja. Ukrštanje se vrši tako što se na slučajan način odabira mesto preseka genetskih materijala. Genetski materijali se razmenjuju i formiraju se dve nove jedinke, na sledeći način:

$$A = \mathbf{100101|01011101011001}$$

$$B = 100010|10100110101010$$

$$C = \mathbf{100101|1010011010101010}$$

$$D = 100101|\mathbf{01011101011001}$$

U ovom slučaju *A* i *B* su roditelji, dok su *C* i *D* deca. Princip turnira je preuzet iz prirode – prilikom parenja mužljaci se bore za naklonost ženke, pri čemu pobednik učestvuje u parenju.

Nakon ukrštanja dolazi do mutacija. Mutacije se retko primenjuju, međutim i za njih se ostavlja prostora. U teoriji evolucije je poznato da mutacije, iako uglavnom štetne, nose ključnu ulogu u napretku neke vrste. Naime, mutacijama se može pojavit gen koji ne postoji u originalnoj populaciji. Ako je gen loš, jedinka će biti slaba i verovatno ga neće uspeti da prenese na potopke. U slučaju dobrog gena, jedinka ga sa velikom verovatnoćom prenosi dalje na svoje potomke. Mutacije se vrše tako što se sa malom verovatnoćom vrši promena jednog binarnog broja:

$$B = 10010\mathbf{1}0100$$

$$B' = 10010\mathbf{0}0100$$

Ovim se završava formiranje nove populacije. U slučaju da u definisanom optimizacionom problemu postoje neka ograničenja tipa jednakosti ili nejednakosti, mora se ispitati da li su ona zadovoljena, i ako nisu, moraju se izvršiti modifikacije tako da budu zadovoljena.

B. Primena GA u definisanom optimizacionom problemu

Da bi se GA implementirao u definisani optimizacioni problem, neophodno je definisati upravljačke promenljive. U ovom slučaju to su snage generatorskih čvorova. Kako je za proračun tokova snaga neophodan referentno – balansni čvor, to se njegova snaga ne definise kao promenljiva. Za referentno – balansi čvor je izabran čvor 1. Kako se optimizacioni problem definiše na nivou od 24h, neophodno je za svaki generatorski čvor definisati 24 podataka o snagama injektiranja. To je sve ukupno $24 \times 5 = 120$ promenljivih.

Snage hidroelektrana nisu nezavisne od sata do sata. Ranije je već navedeno da njihov zbir mora zadovoljavati unapred definisana ograničenja tipa nejednakosti. U programu je to izvedeno na sledeći način. Kod akumulacionih hidroelektrana se na slučajan način bira 24 broja koja prestavljaju procentualni ideo iskoršćenja akumulirane energije. Zbir tih brojeva mora

biti jednak 1. To se izvodi deljenjem tih 24 broja njihovim zbirom. U slučaju da se u nekom satu dobije snaga veća od instalisane, vrši se skaliranje svih vrednosti tako da nijedna snaga ne prelazi gornju granicu. Kod pumpno-akumulacionih hidroelektrana to je izvedeno na nešto drugačiji način. Kod njih se prvo vrši određivanje snage za svaki sat u definisanim granicama. U slučaju da je njihov zbir veći od 0, svaka pozitivna snaga se proporcionalno smanjuje tako da konačni zbir bude jednak 0. Na taj način se zadovoljavaju sva ograničenja tipa nejednakosti. Nakon toga se primenjuje GA na način opisan ranije u tekstu. Ovde treba opet naglasiti da prilikom formiranja svake nove populacije treba proveriti da li su ispunjeni svi definisani uslovi. Ukoliko nisu, neophodno je izvršiti određene modifikacije promenljivih na gore definisan način tako da na kraju budu zadovoljena sva ograničenja.

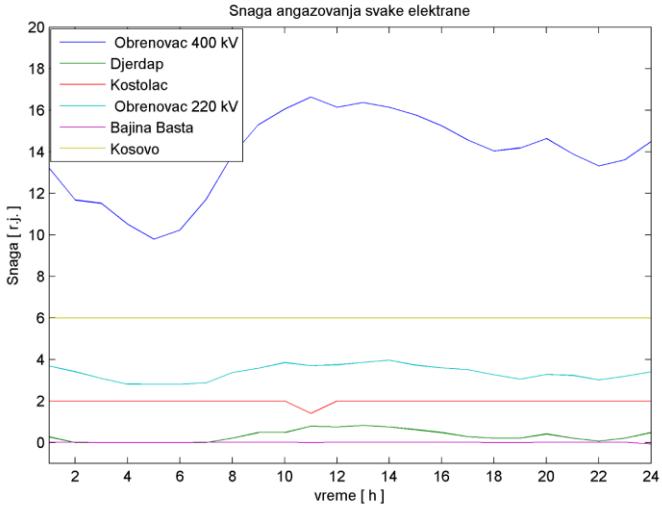
Program za optimizaciju je formiran u programskom paketu MATLAB. Nakon formiranja programa izvršeni su proračuni čiji rezultati su prikazani u glavi IV. Optimizacija je izvršena za 4 različita scenarija.

IV. REZULTATI OPTIMIZACIJE

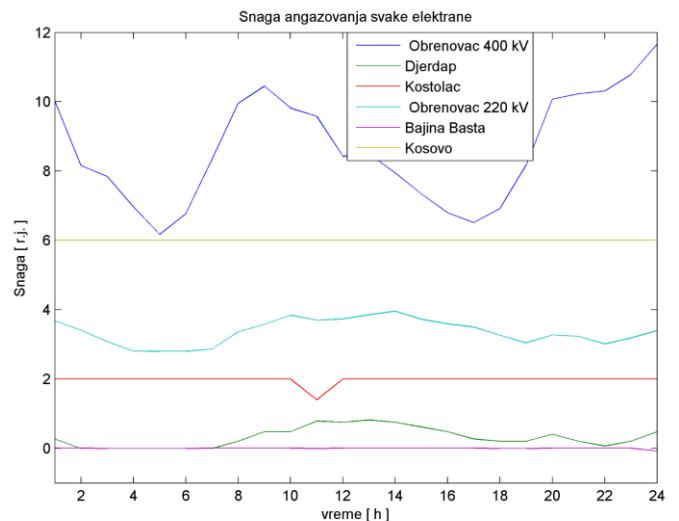
A. Minimum dnevnih gubitaka energije

U prva dva proračuna, optimizacija je vršena u cilju postizanja minimalnih dnevnih gubitaka energije u sistemu. Analize se za ovu kriterijumsku funkciju vrše za dva slučaja. U prvom slučaju se pretpostavlja da u sistemu ne postoje obnovljivi izvori energije, dok su oni u drugom slučaju priključeni u čvorovima ranije definisanim na Sl. 3. Na Sl. 4. prikazani su dijagrami angažovanja elektrana u slučaju sistema bez OIE, dok su na Sl. 5. prikazani isti dijagrami, ali uz prisustvo OIE.

U prvom slučaju, u sistemu bez OIE, dobijena je optimalna vrednost za minimalne dnevne gubitke energije od **5,365 r.j.** Ova vrednost iznosi **536,5 MWh**. Kako je ukupna dnevna potrošnja električne energije 60725 MWh, dobijena vrednost gubitka u prenosnoj 220kV i 400kV mreži iznosi 0,88%.



Slika 4. Angažovanje elektrana u sistemu bez OIE za slučaj optimizacije dnevnih gubitaka energije

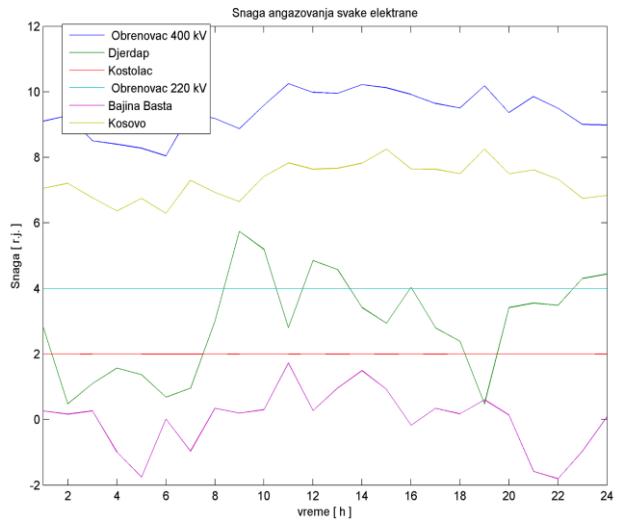


Slika 5. Angažovanje elektrana u sistemu sa OIE za slučaj optimizacije dnevnih gubitaka energije

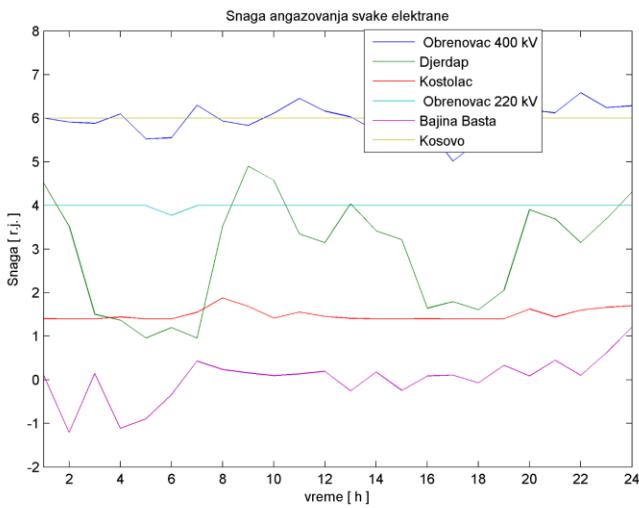
U drugom slučaju, u sistemu sa OIE dobijena je optimalna vrednost za minimalne dnevne gubitke energije od **3,983 r.j.** Ova vrednost iznosi **398,3 MWh**. Kako je ukupna dnevna potrošnja električne energije 60725 MWh, dobijena vrednost gubitka u prenosnoj 220kV i 400kV mreži iznosi 0,656%.

B. Minimum dnevnih pogonskih troškova elektrana

U trećem i četvrtom proračunu, optimizacija se vrši u cilju minimizacije dnevnih pogonskih troškova elektrana. Kao i u prethodnom slučaju, i ovde se analizira sistem sa i bez OIE. Na Sl. 6. prikazan je dijagram angažovanja elektrana za sistem bez OIE, dok je na Sl. 7. prikazan dijagram angažovanja elektrana za sistem sa OIE.



Slika 6. Angažovanje elektrana u sistemu bez OIE za slučaj optimizacije dnevnih pogonskih troškova



Slika 7. Angažovanje elektrana u sistemu bez OIE za slučaj optimizacije dnevnih pogonskih troškova

U prvom slučaju, u sistemu bez OIE, dobijena je vrednost optimalnih pogonskih troškova od $2,508 \cdot 10^6$ NJ, dok ta vrednost u slučaju sistema sa OIE iznosi $1,876 \cdot 10^6$ NJ. Ovi troškovi su posledica pre svega smanjenja angažovanja termoelektrana, odnosno uštede u potrošnji uglja. U ovim analizama, zanemareni su troškovi Feed-in Tariff-e insalisanih obnovljivih izvora energije.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izvršena komparativna analiza optimalne preraspodele snaga elektrana u sistemima sa i bez obnovljivih izvora energije. Strategija preraspodele snage dosta zavisi od toga koja je kriterijumska funkcija optimizacije, kao i od toga kakvi su trenutni resursi OIE.

U slučaju kada je kriterijumska funkcija minimum dnevnih gubitaka energije, uočava se da centralna uloga u proizvodnji pripada referentno – balansnom čvoru koji se i nalazi u samom „težištu“ potrošnje analiziranog sistema. Ostali čvorovi, što su udaljeniji od „težišta“ potrošnje, njihova uloga u proizvodnji biva sve manja. Tako se dobija da je snaga hidroelektrana približno jednaka nuli. U obzir treba uzeti da proizvodnja iz konvencionalnih elektrana mora sve vreme pratiti razliku potrošnje i proizvodnje iz OIE. Upravo zbog toga se u večernjim satima događa da usled naglog povećanja potrošnje koje ispraćeno naglim smanjivanjem proizvodnje iz OIE, dolazi do nagle promene snage termoelektrane u balansnom čvoru. Čak i kada je to tehnički moguće, u sistemima se retko primenjuje.

U slučaju da je kriterijumska funkcija optimizacija dnevnih pogonskih troškova, dijagrami angažovanja elektrana su realniji. Na obe slike je moguće uočiti da su dijagrami proizvodnje termoelektrana gotovo ravnii. Razlog za to je

kvadratna funkcija pogonskih troškova koja dovodi do toga da termoelektrane pokrivaju uglavnom bazne dijagrame potrošnje. Ulogu vršnih elektrana imaju hidroelektrane. Takođe se može uočiti da OIE dovode do smanjivanja snage termoelektrana, dok njihovi oblici ostaju gotovo isti. Razlog za to je što termoelektrane pokrivaju baznu potrošnju. Do promene oblika dijagrama snage dolazi uglavnom kod hidroelektrana koje imaju zadatak da popune vršna opterećenja.

LITERATURA

- [1] H. Glavitsch, R. Bacher, Optimal Power Flow Algorithms, Swiss Federal Institute of Technology, CH-8092 Zurich, Switzerland, 1991.
- [2] M. Bollen, F. Hassan, Integration of Distributed Generation in the Power System, IEEE Press and A John Wiley and Sons, 2011.
- [3] S. Lin, J. Chen, Distributed Optimal Power Flow for Smart Grid Transmission system with Renewable Energy Sources, Energy, vol. 56, pp. 184-192, 2013.
- [4] L. Dulau, M. Abrudean, D. Bica, Optimal Power Flow analysis of a Distributed Generation System, Procedia Technology, vol. 19, pp. 673-680, 2015.
- [5] P. Eser, A. Singh, N. Chokani, R. S. Abhari, Effect of increased renewables generation on operation of thermal power plants, Applied Energy, vol 164, pp. 723-732, 2016.
- [6] R. Roy, H. T. Jadhav, Optimal power flow solution of power system incorporating stochasting wind power using Gbest guided artifical bee colony algorithm, Electrical Power and Energy Systems, vol. 64, pp. 562-578, 2015.
- [7] Integration of Renewable Energy Sources in future power system: The role of storage, Renewable Energy, vol. 75, pp. 14-20, 2015.
- [8] M. Mitchell, An Introduction to Genetic Algorithm, A Bradford Book The MIT Press, 1998.
- [9] N. Rajaković, M. Čalović, P. Stefanov, A. Savić, 100 rešenih zadataka iz Analize elektroenergetskih sistema, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2002.
- [10] M. Čalović, A. Sarić, P. Stefanov, Eksploatacija elektroenergetskih sistema u uslovima slobodnog tržišta, Tehnički fakultet Čačak, Beograd, 2005.

ABSTRACT

With the advent of Renewable Energy Sources (RES), the net power diagrams in consumption nodes can be significantly changed. The reason for this is the intermittent nature of RES. In this research paper, changes that RES bring to optimal redistribution of power within power plants are analyzed. The analyses are carried out on a time interval of 24 hours and they consider spatiotemporal coordination of thermal power plants, impoundment power plant and pumped storage power plant. Optimization criteria are the minimum daily energy losses and minimum daily operating costs. For analysis, 220kV and 400kV network of Serbia is used. Diagrams production from solar and wind farms are realistic. The results of analysis and simulation obtained in this paper provide a better insight into the changes that RES entered into an optimal spatial and temporal coordination of the different types of plants in a power system.

OPTIMAL UNIT COMMITMENT IN POWER SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

Dimitrije Kotur, Pavle Dakić, Željko Đurišić