

**RJEŠAVANJE PROBLEMA EKONOMSKOG DISPEČINGA UZ UVAŽAVANJE
OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE, BAZIRANO NA GENETSKOM ALGORITMU**
**GENETIC ALGORITHM BASED SOLUTION FOR ECONOMIC DISPATCH PROBLEM
CONSIDERING RENEWABLE ENERGY SOURCES**

Stanka Košutić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – PRIMJENJENO SOFTVERSKO
INŽENJERSTVO**

Kratak sadržaj – *Oblast koja je analizirana u ovom radu jeste ekonomski dispečing uz uvažavanje obnovljivih izvora energije, kao i njegovo rješenje putem genetskog algoritma. Ekonomski dispečing podrazumijeva nalaženje optimalne preraspodjele opterećenja između proizvodnih agregata koji su u pogonu, sa ciljem da se postignu minimalni troškovi rada uz uvažavanje sistemskih ograničenja i uslova. Ekonomski dispečing podrazumijeva određivanje snaga proizvodnje raspoloživih generatorskih jedinica, tako da ukupni pogonski troškovi u sistemu budu minimalni.*

Ključne reči: *Ekonomski dispečing, genetski algoritam, optimizacija rada, ekonomija, generatori, obnovljivi izvori energije.*

Abstract – *The problem analyzed in this paper is economic dispatching as well as its solution through a genetic algorithm. Economic dispatching implies finding the optimal load redistribution between units in operation to achieve minimum operating costs while respecting system constraints, i.e., economic dispatching involves determining the production power of available generator units so that total operating costs in the system are minimal.*

Keywords: *Economic dispatch, genetic algorithm, optimization, economy, generators, renewable sources of energy*

1. UVOD

Proizvodnja električne energije iz konvencionalnih termoelektrana dovela je do značajnih klimatskih promjena uzrokovanih emisijom štetnih gasova. Ovaj problem, kao i ograničena količina fosilnih energetske resursa i sve veća potreba za održivijom elektroenergetskom mrežom, doveli su do povećanja korišćenja obnovljivih izvora energije u elektroenergetskim sistemima. Javlja se potreba za izučavanjem njihovog uticaja na eksploataciju i planiranje rada elektroenergetskog sistema. Integracijom obnovljivih izvora energije proizilaze mnoge ekonomske i ekološke prednosti.

Sa druge strane, one dovode do povećanja varijabilnosti i nestabilnosti rada sistema, što povećava teškoće prilikom

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Aleksandar Selakov.

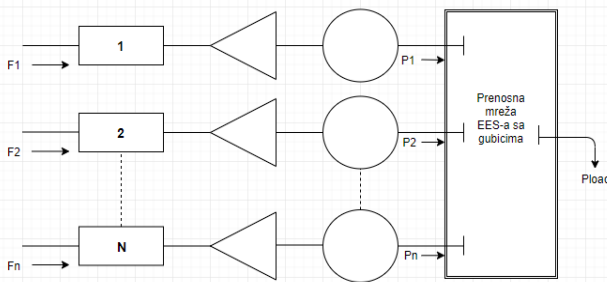
upravljanja. Složenost balansiranja proizvodnje i potrošnje uz uvažavanje sistemskih ograničenja i minimizacijom proizvodnih troškova, pojavom novih „zelenih“ izvora energije, predstavlja još veći izazov na koji je potrebno odgovoriti. Cilj proračuna optimalnog rada elektroenergetskog sistema je pronalaženje optimalne kombinacije proizvodnje električne energije iz pojedinih generatora, i izbora pozicije regulacione sklopke na transformatorima koji mogu da mijenjaju položaj pod opterećenjem, a sve u cilju minimizacije troškova proizvodnje termalnih jedinica, ukupne emisije gasova, kao i ukupnih gubitaka aktivne snage uz zadovoljavanje fizičkih i tehničkih ograničenja mreže. Rješavanju ovoga problema dosta pažnje je posvećeno u sektoru planiranja, upravljanja i kontrole elektroenergetskog sistema. Ova tematika se definiše kao problem angažovanja agregata koji je moguće podijeliti na dvije cjeline: izbor agregata i ekonomski dispečing.

Problematika koja je analizirana u ovom radu jeste ekonomski dispečing kao i njegovo rješenje putem genetskog algoritma. Ekonomski dispečing podrazumijeva nalaženje optimalne preraspodjele opterećenja između agregata koji su u pogonu, sa ciljem da se postignu minimalni troškovi rada uz uvažavanje sistemskih ograničenja, odnosno, ekonomski dispečing podrazumijeva određivanje snaga proizvodnje raspoloživih generatorskih jedinica, tako da ukupni pogonski troškovi u sistemu budu minimalni. Preraspodjela se obično vrši na satnom nivou, sa tendencijom smanjenja vremenskog intervala porastom udjela obnovljivih izvora i razvojem tržišta električne energije.

2. EKONOMSKI DISPEČING

Da bi se održavao visok stepen ekonomičnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sistema (EES), ekonomski dispečing je jedna od opcija dostupna preduzećima. Ekonomski dispečing (engl. *Economic dispatch – ED*) jedan je od temeljnih problema elektroenergetskog sistema čiji je cilj smanjenje ukupnih troškova proizvodnje električne energije. Ekonomski dispečing elektroenergetskog sistema je problem optimalnog raspoređivanja proizvodnje na generatorske jedinice, pri čemu se moraju zadovoljiti uslovi sigurnosti i kvaliteta rada sistema uz minimizaciju troškova proizvodnje. Ovaj algoritam podrazumijeva određivanje snaga proizvodnje tako da ukupni troškovi sistema budu minimalni. Najvažniji aspekti u velikom sistemu međusobno povezanih generatora su planirani i njihov rad treba osigurati da sistem radi ekonomično kako bi podnio

zahtjevano opterećenje. Elektrane se sastoje od jednog ili više paralelno spojenih generatora. Slika 1 pokazuje sistematski dijagram paralelno povezanih N generatora sa opterećenjem [2]. Ovi generatori su povezani na sabirnicu sa opterećenjem. Glavni cilj je snadbijevanje električnom energijom sa sigurnošću i minimiziranjem troškova proizvodnih jedinica, uz zadovoljavanje svih ograničenja u sistemu. Ako sve ove jedinice imaju iste ili identičane ulazno/izlazne karakteristike, opterećenje se može ravnomjerno raspodijeliti. Međutim, u praktičnim slučajevima sve ove proizvodne jedinice imaju različite ulazno/izlazne karakteristike, što implicira da je cijena svake jedinice različita. Ekonomski dispečing je važan za varijaciju snaga generatora sa generatorskim ograničenjima, tako da ove jedinice zadovoljavaju opterećenje unutar optimalnih troškova goriva.



Slika 1. N generatorskih jedinica opslužuju opterećenje Pload uz uključivanje gubitaka u mreži

2.1. Formulacija problema

Kriterijumska funkcija za posmatrani vremenski period za koji se traži optimalna raspodjela snaga na izlazu generatorskih jedinica, predstavljena je sumom pogonskih troškova svih agregata za koje se vrši analiza:

$$\min F_t = \sum_{i=1}^N F_i(P_{Gi}) \quad (1)$$

Pogonski troškovi (troškovi rada) generatorskih jedinica se obično predstavljaju kvadratnom funkcijom. Za troškove održavanja, skladištenja, transporta i sopstvene potrošnje, smatra se da ne zavise od izlazne snage agregata, pa su oni predstavljeni slobodnim članom. Drugi dio funkcije pogonskih troškova predstavljaju troškovi proizvodnje električne energije, tj. troškovi sagorijevanja goriva, i oni zavise od izlazne snage generatora. Pogonski troškovi odgovarajuće i-te generatorske jedinice računaju se sledećom relacijom:

$$F_i(P_{Gi}) = \alpha_i * P_{Gi}^2 + \beta_i * P_{Gi} + \gamma_i \quad (2)$$

Oznake:

α_i [\$/Mw²], β_i [\$/MW], γ_i [\$] – koeficijenti pogonskih troškova

P_{Gi} – izlazna jednočasovna snaga i-tog generatora [MW]

F_t – suma troškova proizvodnih jedinica

$F_i(P_{Gi})$ – troškovi i-tog generatora, kada je izlazna snaga datog generatora P_{Gi}

N – broj proizvodnih jedinica (generatora) u EES – u

Ograničenja:

Ograničenje balansne jednačine snage – ukupna proizvodnja svih generatora mora biti jednaka sumi

gubitaka (P_D) i potrošnje (P_L) umanjene za proizvodnju iz obnovljivih izvora energije (P_{RES}).

$$P_D - P_{RES} + P_L = \sum_{i=1}^N P_{Gi} \quad (3)$$

Generatorska ograničenja proizvodnje – izlazna snaga svake generatorske jedinice mora biti između nominalne snage i snage koja odgovara njenom tehničkom minimum

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (4)$$

3. GENETSKI ALGORITAM

Evolucioni algoritmi su algoritmi inspirisani biološkom evolucijom, primjenjivi na širok skup problema. Pojavili su se već u pedesetim godinama 20. vijeka, te se neprestano razvijaju sve do danas. Prednost te klase algoritama je u tome što ih je moguće primijeniti u slučajevima kad ne postoji neka unaprijed određena, jasno definisana metoda za rješavanje nekog postupka ili postojeće metode imaju preveliku složenost. Jedan primjer za to je traženje optimuma funkcije više varijabli čiji analitički oblik nije poznat. Optimum bi se mogao pronaći uz iscrpnu pretragu svih mogućih kombinacija vrijednosti varijabli, međutim, takav postupak naprosto traje predugo. Princip rada genetskog algoritma se može opisati sledećim koracima [6]:

- Definisanje svih potrebnih parametara problema
- Inicijalizacija početne populacije
- Određivanje prilagođenosti hromozoma (tzv. **fitness** funkcija)
- Odabir selekcije hromozoma koji će opstati za ukrštanje
- Ukrštanje – iz boljeg dijela populacije se odaberu roditelji koji će na neki način ukrstiti svoj genetski materijal i dati jednog ili više potomaka koji obično zamijene nekog od lošijih hromozoma
- Mutacije – pri kojima se mijenja genetski sadržaj hromozoma
- Ispitivanje konvergencije – da bi se utvrdilo da li ima osnova da se tok algoritma prekine, ukoliko nije ispunjen uslov konvergencije vrši se povratak na korak 3.

3.1. Primjena genetskog algoritma na problem ED

Kriterijumska funkcija (**fitness**) je definisana u genetskoj reprezentaciji i mjeri kvalitet predstavljenog rješenja. U implementaciji genetskog algoritma koja je opisana u ovom radu, korišćena je **fitness** funkcija koja mjeri kvalitet rješenja na osnovu određenih proračuna nad genima u jedinki (jednom rješenju). Rezultat funkcije je ukupan trošak proizvodnje vezan za korišćenje konkretne raspodjele opterećena na generatorskim jedinicama koje koriste OIE, gdje su uvažena sva zahtjevana ograničenja i uslovi. Cilj jeste pronaći minimalnu sumu troškova proizvodnje, odnosno, najmanju vrijednost **fitness** funkcije, zadovoljavajući tražene uslove. Prethodno definisani pogonski troškovi odgovarajuće i-te generatorske jedinice [3]:

$$(P_{Gi}) = \alpha_i * P_{Gi}^2 + \beta_i * P_{Gi} + \gamma_i \quad (5)$$

Kriterijumskom funkcijom tražimo najbolju jedinku (rješenje – najmanji troškovi proizvodnje), tako što, za

svaku jedinku sledećom logikom provjeravamo njen kvalitet (troškovi proizvodnje):

$$\begin{aligned} \text{FitnessFunctio} = & \alpha_1 * P_{G1}^2 + \beta_1 * P_{G1} + \gamma_1 \\ & + \dots + \alpha_n * P_{Gn}^2 + \beta_n * P_{Gn} \\ & + \gamma_n \end{aligned} \quad (6)$$

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Genetski algoritam je korišćen za rješenje problema ekonomskog dispečinga i rezultati su analizirani. Algoritam je implementiran u C# programskom jeziku. Glavni cilj je minimiziranje troškova generatorskih jedinica koristeći GA, uz zadovoljavanje ograničenja i isporučivanje zahtjevane snage.

Jedna jedinka je opisana putem vrijednosti *fitness*-a (rezultat funkcije prilagođavanja) i gena. Sadrži metode za mutaciju i ukrštanje.

Ukrštanje se vrši metodom *flip coin* – ako je vrijednost ≤ 0.5 uzima se gen jednog roditelja, a ako je veća uzima se gen drugog roditelja, nakon toga potomci se dodaju u populaciju.

U svakoj novonastaloj jedinki postoji vjerovatnoća da se dogodi mutacija. Korišćena je uniformna mutacija – vrijednost određenog gena mijenja se sa nasumično odabranom vrijednošću koja se nalazi u granicama određenim za dotični gen. Cilj mutacije jeste izbjegavanje lokalnih optimuma i obnavljanje izgubljenog genetskog materijala.

Jedinka se sastoji od skupa parametara – gena. Rješenje je testirano za elektroenergetski sistem od tri generatorske jedinice, tako da, jedna jedinka ima tri gena (jedan gen – jedan generator).

Svaki od gena predstavlja vrijednost izlazne snage generatora, gdje se za izlazni napon postavlja slučajno (random) generisana vrijednost u opsegu dozvoljene minimalne i maksimalne snage generatora.

Odabrani geni (izlazne snage) se množe sa odgovarajućim troškovnim koeficijentima za pojedini generator, i kao suma tih vrijednosti dobiju se ukupni troškovi proizvodnje za tu kombinaciju izlaznih snaga (jedinka).

Računanje ukupnih troškova, odnosno kvalitet jedne jedinice, računa se u kriterijumskoj funkciji. Kriterijumska funkcija je funkcija „prilagodljivosti“, koja određuje sposobnost jedinice da se takmiči sa drugim jedinkama. Vjerovatnoća da će jedinka biti odabrana za reprodukciju bazira se na funkciji prilagodljivosti.

4.1. Test slučaj 1

U testu je analiziran sistem sa tri generatorske jedinice, gde su parametri prikazani u Tabeli 1.

U Tabeli 2 su prikazani rezultati optimizacije putem genetskog algoritma. Za isporučivanje zahtjevane snage potrošačima koja iznosi 300MW, pronađeno je najbolje rješenje raspodjele opterećenja na generatorima tako da troškovi budu najmanji (sa uračunatim gubicima).

Uočen je veliki broj formiranih generacija (oko 250), odnosno veliki broj kreiranih jedinki (oko 1000).

Tabela 1. Podaci o generatorima

Generator	α	β	γ	P_{min}	P_{max}
1	0.00525	8.66	328.13	100	300
2	0.00609	10.040	136.91	50	200
3	0.00592	10.040	59.16	10	90

Tabela 2 – Rezultati algoritma

	Genetski algoritam
P1	149.8
P2	117.6
P3	42.6
Zahtjevana snaga	300.0
Gubici	10.5
Ukupni troškovi	3627.511

4.2. Test slučaj 2

U testu je analiziran sistem sa tri generatorske jedinice, gdje su parametri prikazani u Tabeli 1. U Tabeli 2 su prikazani rezultati optimizacije putem genetskog algoritma. Za isporučivanje zahtjevane snage potrošačima koja iznosi 300MW, pronađeno je najbolje rješenje raspodjele opterećenja na generatorima tako da troškovi budu najmanji (sa uračunatim gubicima).

Tabela 3. Podaci o generatorima

Generator	α	β	γ	P_{min}	P_{max}
1	0.00777	13.67	45.12	50	300
2	0.00111	2.04	434.12	50	200
3	0.00333	30.69	242.16	15	120

Tabela 4. Rezultati algoritma

	Genetski algoritam
P1	251.1
P2	228.4
P3	44.0
Zahtjevana snaga	500.0
Gubici	23.5
Ukupni troškovi	6524.453

Potrebno vrijeme za pronalazak rješenja jeste oko 25s. Jedan od razloga za sporiji rad sa ovim podacima jeste i veća mogućnost izbora random vrijednosti gena u početnoj populaciji (veći dozvoljeni opsezi snage generatora). U ovom slučaju je potrebno isporučiti snagu od 500MW, a najmanji troškovi koje je algoritam pronašao za isporučivanje ove snage iznose 6524.453\$. Malo veći broj jedinici je kreiran nego u prošlom slučaju (oko 1200).

4.3. Test slučaj 3

U ovom test slučaju iskorišćeni su podaci iz prethodnog testa. Razlika jeste u broju formiranja jedinki. Umjesto 4 jedinice, u svakoj iteraciji nastaje novih 100 jedinki. Ubrzan je postupak dolaska do rješenja, i sada iznosi oko 10s. Ako je jedinki premalo, genetski algoritam ima slabe mogućnosti izvođenja ukrštanja i mala veličina prostora pretrage otežava pronalaženje optimalnog rješenja problema. S druge strane, prevelik broj hromozoma može da uspori rad genetskog algoritma.

4.4. Prednosti i mane genetskog algoritma

Prednosti: proizvoljni optimizacijski problem, puno mogućnosti nadogradnje, ponavljanje postupka rješavanja, daje skup potencijalnih rješenja i traži najbolje, jednostavnost izvođenja.

Mane: često potrebno prilagoditi problem ili algoritam, veliki uticaj parametara, priroda rješenja je nepoznata, sporost proračuna.

5. ZAKLJUČAK

Kako će porasti upotreba obnovljivih izvora energije u budućnosti, važno je provesti proučavanje uticaja njihove upotrebe na rad elektroenergetskog sistema, posebno na problem ekonomskog dispečinga. Ovaj rad predstavlja izvještaj o početnoj studiji koja se fokusira na upotrebu genetskog algoritma za detaljno ispitivanje ovoga problema. Dokazano je da uključivanje obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem ima uticaja na troškove, varijabilnosti opterećenja i proračuna rezervi.

Jedan od predstavnika evolucijskih algoritama – genetski algoritam, je prilagođen rješavanju konkretnog problema – ekonomskog dispečinga u elektroenergetskom sistemu. Glavni cilj jeste olakšan i pouzdan proces pronalaska najboljeg rješenja za optimalnu raspodjelu opterećenja između generatorskih jedinica, tako da ukupni pogonski troškovi budu minimalni. U ovom radu su analizirani različiti faktori koji utiču na novac koji se utroši prilikom proizvodnje električne energije u elektranama koje koriste obnovljive izvore energije. Analizirani su procenti iskorišćavanja različitih obnovljivih izvora energije, prednosti i manje njihovog korišćenja, kao i troškovi i ulaganja potrebna za dobijanje električne energije iz istih. Brzom pretragom i kombinacijom različitih parametara, uz zadovoljavanje svih potrebnih ograničenja i uslova, genetski algoritam traži najbolje rješenje koje predstavlja najmanje troškove proizvodnje.

U budućnosti će se preduzimati sveobuhvatniji posao, koji će razmotriti nekoliko aspekata, kao što su: proračun emisije štetnih gasova, gubici u prenosu, realniji model elektroenergetskog sistema, prognozu snage vjetra, kao i troškove. Poređenje sa drugim metodama će takođe biti od velike važnosti za mjerenje efikasnosti ove metode u rješavanju problema.

6. LITERATURA

- [1] Fraunhofer ISE, „Levelized Cost of Electricity; Renewable Energy Technologies“, Njemačka, studeni 2013.
- [2] Power Generation, Operation and Control
- [3] SOLVING ECONOMIC DISPATCH PROBLEM USING HYBRID GA-PS-SQP METHOD, Jamal S. Alsumait, Student Member, Jan K. Sykulski, Senior Member
- [4] <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/30/017/30017703.pdf>
- [5] Solving Renewables-Integrated Economic Load Dispatch Problem by Variant of Metaheuristic Bat Inspired
- [6] GENETSKI ALGORITAM U PRIMJENI, SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
- [7] Niknam, T.; Azizipanah-Abarghooee, R.; Aghaei, J. A new modified teaching-learning algorithm for reserve constrained dynamic economic dispatch. IEEE Trans. Power Syst. 2012, 28, 749–763.
- [8] Niknam, T.; Azizipanah-Abarghooee, R.; Aghaei, J. A new modified teaching-learning algorithm for reserve constrained dynamic economic dispatch. IEEE Trans. Power Syst. 2012, 28, 749–763.
- [9] Komparativna analiza troškova proizvodnje električne energije, University of Zagreb, Faculty of Economics and Business / Sveučilište u Zagrebu, Ekonomski fakultet

Kratka biografija:



Stanka Košutić je rođena 25.09.1997. godine u Gacku. Osnovnu školu završila je 2012. godine u Gacku. Gimnaziju “Pero Slijepčević” u Gacku završila je 2016. godine. Iste godine, upisala je u Novom Sadu Fakultet tehničkih nauka, odsjek Primjenjeno softversko inženjerstvo, koji je završila 2020, zatim upisala master studije na istom odsijeku. Položila je sve ispite predviđene planom i programom.