

Eksploatacija EES-a

Ekonomski proračuni u eksploataciji
elektroenergetskih sistema
(Optimalni tokovi snaga – OPF)

Optimalni tokovi snaga (*Optimal Power Flow* - OPF)

- Ekonomski dispečing (ED) je proračun koji ima za cilj nalaženje najjeftinije proizvodnje grupe generatora uz poštovanje njihovih pogonskih ograničenja.
- Kao rezultat dobija se ukupna proizvodnja generatorskih jedinica koja je jednaka zbiru ukupne potrošnje i gubitaka.
- ED proračun ne uvažava efekte proizvodnje generatora na tokove snaga u mreži kao i uticaj na naponske prilike.
- Proizvodnja generatora može da ima značajne efekte na mrežu i to se, pod određenim okolnostima, mora uzeti u obzir.

Optimalni tokovi snaga

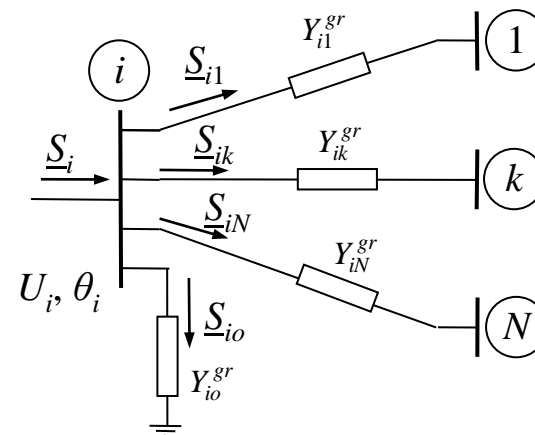
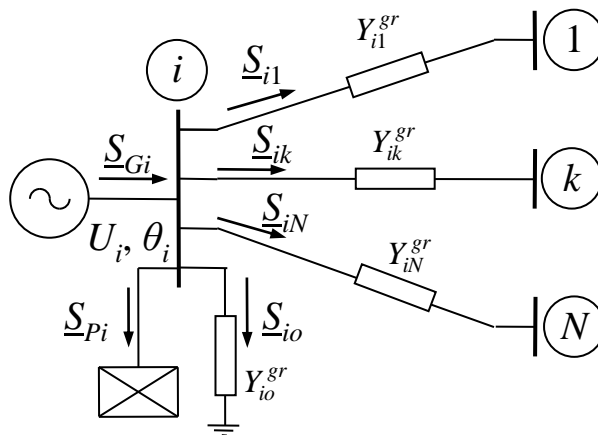
Uvod

- OPF proračun objedinjuje ED proračun sa proračunom tokova snaga, tako da se ova dva proračuna vrše istovremeno.
- Kod OPF proračuna gubici u prenosu su uključeni u proračun preko proračuna tokova snage i nema potrebe da se oni posebno modeluju i računaju.
- Što je još važnije, kod OPF proračuna ED može biti ograničen tako da zadovolji ograničenja po aktivnim i reaktivnim snaga na vodovima ili transformatorima i ograničenja po naponima na sabirnicama.
- Rezultat OPF proračuna je snaga proizvodnje generatora takva da su ukupni troškovi minimalni.
- Takođe, OPF proračunom dobijaju se tokovi snaga po granama i naponske prilike u mreži.
- Potrebno je naglasiti da se kod OPF proračuna mogu koristiti i drugačiji kriterijumi optimizacije, na primer minimizacija gubitka aktivne snage, optimizacija naponskog profila i sl.

Optimalni tokovi snaga

Proračun tokova snaga (PF)

- Pre opisa OPF proračuna daće se osnovni koncept proračuna tokova snaga (*Power Flow* - PF).
- Neka je dat proizvoljan čvor i . Napon tog čvora je U_i dok je ugao tog napona θ_i .
- U tom čvoru, u opštem slučaju, ima se generisanje i potrošnja.
- Iz tog čvora polaze grane prema ostalim čvorovima. Prikaz je dat na slici.



Optimalni tokovi snaga

Proračun tokova snaga (PF)

- Razlika snage generisanja (\underline{S}_{Gi}) i snage potrošnje (\underline{S}_{Pi}) predstavlja snagu injektiranja ($\underline{S}_i = P_i + jQ_i$).
- Snaga injektiranja može da se tumači kao snaga koja se injektira, odnosno ubacuje u mrežu.
- Sa slike se može videti da se snaga injektiranja može izračunati kao zbir snaga po granama koje polaze iz posmatranog čvora, odnosno:

$$\underline{S}_i = \underline{S}_{io} + \sum_{k=1, k \neq i}^N \underline{S}_{ik}$$

- Prema šemi sa slike važi:

$$\underline{S}_{io} = \underline{U}_i \left(\underline{U}_i \cdot \underline{Y}_{io}^{gr} \right)^*$$

$$\underline{S}_{ik} = \underline{U}_i \left[\left(\underline{U}_i - \underline{U}_k \right) \cdot \underline{Y}_{ik}^{gr} \right]^*, k = 1, \dots, N, k \neq i$$

Optimalni tokovi snaga

Proračun tokova snaga (PF)

- Snaga injektiranja je sada:

$$\underline{S}_i = \underline{U}_i \left[\underline{U}_i \cdot \underline{Y}_{io}^{gr} + \sum_{k=1, k \neq i}^N (\underline{U}_i - \underline{U}_k) \cdot \underline{Y}_{ik}^{gr} \right]^*$$

- Grupisanjem uz odgovarajuće napone dobija se:

$$\underline{S}_i = \underline{U}_i \left[\left(\underline{Y}_{io}^{gr} + \sum_{k=1, k \neq i}^N \underline{Y}_{ik}^{gr} \right) \underline{U}_i - \sum_{k=1, k \neq i}^N \underline{Y}_{ik}^{gr} \cdot \underline{U}_k \right]^*$$

odnosno:

$$\underline{S}_i = \underline{U}_i \left[\underline{Y}_{ii} \cdot \underline{U}_i + \sum_{k=1, k \neq i}^N \underline{Y}_{ik} \cdot \underline{U}_k \right]^*$$

gde su i odgovarajući elementi matrice admintansi nezavisnih čvorova koji se računaju preko sledećih jednačina

$$\underline{Y}_{ii} = \underline{Y}_{io}^{gr} + \sum_{k=1, k \neq i}^N \underline{Y}_{ik}^{gr}, \quad i = 1, \dots, N$$

$$\underline{Y}_{ik} = -\underline{Y}_{ik}^{gr}, \quad i = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, N$$

Optimalni tokovi snaga

Proračun tokova snaga (PF)

- Ako se u izraz za snagu injehtiranja uvedu smene:

$$\underline{Y}_{ik} = G_{ik} + jB_{ik} \quad \underline{U}_i = U_i e^{j\theta_i} \quad \underline{U}_k = U_k e^{j\theta_k}$$

posle sređivanja i razdvajanja realnog i imaginarnog dela jednačine za snagu injehtiranja dobijaju se jednačine:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_i - G_{ii} U_i^2 - \sum_{k=1, k \neq i}^N U_i U_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] = 0 \\ \Delta Q_i &= Q_i + B_{ii} U_i^2 - \sum_{k=1, k \neq i}^N U_i U_k [G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)] = 0 \end{aligned} \quad , i = 1, 2, \dots, N \quad (*)$$

- Veličine ΔP_i i ΔQ_i u jednačinama (*) mogu se tumačiti kao odstupanje ("mismatch") poznate od izračunate vrednosti snage injehtiranja.
- Pri proračunu je potrebno ove veličine dovesti do vrednosti koje su bliske 0. Time se postiže bilans snaga po čvorovima.

Optimalni tokovi snaga

Proračun tokova snaga (PF)

- Cilj proračuna tokova snaga i naponskih prilika je rešavanje jednačina (*).
- Proračun tokova snaga je tako koncipiran da je cilj određivanje nepoznatih promenljivih stanja, a to su moduli i uglovi napona.
- Mreža od N čvorova ima ukupno $2N$ promenljivih stanja (N modula i N uglova). Takođe ima se $2N$ jednačina i to N jednačina po aktivnoj snazi i isto toliko po reaktivnoj snazi. To su jednačine (*).
- Za rešavanje nepoznatih promenljivih stanja nije nam potrebno svih $2N$ jednačina iz prostog razloga što su neke od promenljivih stanja poznate.
- One su ili zadate ili kontrolisane u mreži. U svakom slučaju su poznate.
- U tabeli je dat pregled veličina po pojedinim tipovima čvorova:

	Gener. čvor PU	Potr. čvor PQ	Bal. ref. čvor SL
Poznato	P_i, U_i	P_i, Q_i	U_i, θ_i
Nepoznato	Q_i, θ_i	U_i, θ_i	P_i, Q_i
Broj čvorova	N_{PU}	N_{PQ}	1

Optimalni tokovi snaga

Proračun tokova snaga (PF)

- Generatorski, odnosno PU čvorovi su oni čvorovi u kojima se aktivna snaga injektiranja održava na zadatoj vrednosti.
- Pored toga i moduli napona se održavaju takođe na zadatoj vrednosti i to po pravilu pomoću automatske regulacije napona (pobude).
- Potrošački, odnosno PQ čvorovi su oni čvorovi u kojima su i aktivno i reaktivno injektiranje zadate veličine.
- Razlog za uvođenje balansnog čvora nalazi se u činjenici da se ne mogu specificirati aktivna injektiranja svih čvorova (jer bi se na taj način predodredili gubici aktivne snage u mreži, a gubici se bez poznavanja modula napona i tokova snaga po granama ne mogu unapred odrediti), tako da se mora ostaviti bar u jednom čvoru aktivno injektiranje kao nepoznato.
- Slično važi i za reaktivna injektiranja, ali je tu problem blaži jer su reaktivna injektiranja po generatorskim čvorovima ostavljena kao nepoznate veličine.

Optimalni tokovi snaga

Proračun tokova snaga (PF)

- Na osnovu tabele vidi se da je broj nepoznatih modula napona N_{PQ} , a broj nepoznatih uglova napona $N_{PQ}+N_{PU}$. Prema tome ukupan broj nepoznatih promenljivih stanja jednak je $2N_{PQ}+N_{PU}$.
- Da bi se odredile ove promenljive stanja potrebno je isto toliko jednačina, odnosno potrebno je $2N_{PQ}+N_{PU}$ jednačina. Postavlja se pitanje kako izabrati $2N_{PQ}+N_{PU}$ jednačina od ukupno $2N$ jednačina koje je potrebno rešavati.
- Odgovor je jednostavan. Rešavaju se one jednačine koje odgovaraju čvorovima kod kojih se poznaju aktivne i reaktivne snage injeckiranja.
- To je i logično ako se pogledaju jednačine (*). U njima figurišu snage injeckiranja tako da ima smisla rešavati one jednačine kod kojih su ove veličine poznate.
- Na osnovu date tabele može se dati i pregled jednačina koje se rešavaju.
- Rešava se $N_{PQ}+N_{PU}$ jednačina po aktivnoj snazi (poznaju se aktivne snage injeckiranja u PQ i PU čvorovima) i N_{PQ} jednačina po reaktivnoj snazi (poznaju se reaktivne snage injeckiranja u PQ čvorovima).

Optimalni tokovi snaga

Proračun tokova snaga (PF)

- Za rešavanje jednačina (*) postoji više metoda. Najpoznatije su:
 - Newton–Rapson–ov metod
 - Gauss–Seidel–ov metod
 - Stott–ov raspregnuti metod.
- Njuton-Rafsonov metod je standardan metod i njega uglavnom koriste profesionalni programi za proračune tokova snaga.
- Suštinska razlika PF i OPF proračuna po pitanju tretiranja pojedinih promenljivih sastoji se u sledećem.
- Kod PF proračuna aktivne snage injektiranja u generatorskim čvorovima kao i naponi u generatorskim čvorovima su unapred zadate veličine.
- Kod OPF proračuna te veličine su upravljačke promenljive koje treba odrediti tako da se dobiju minimalni troškovi proizvodnje a da se pri tome zadovolje sva pogonska ograničenja.
- OPF proračun daje i ostale veličine u mreži.

Optimalni tokovi snaga

Model

- Sada se može definisati i OPF problem. Potrebno je minimizovati troškove proizvodnje agregata uz uvažavanje ograničenja.
- Kriterijumska funkcija:

$$\min \sum_{i=1}^{N_{Gen}} F_i(P_{Gen_i})$$

- Ograničenje po proizvodnji aktivne i reaktivne snage generatora:

$$P_{Gen_i}^{\min} \leq P_{Gen_i} \leq P_{Gen_i}^{\max}, i = 1, \dots, N_{Gen}$$

$$Q_{Gen_i}^{\min} \leq Q_{Gen_i} \leq Q_{Gen_i}^{\max}, i = 1, \dots, N_{Gen}$$

gde je

P_{Gen_i} aktivna snaga generisanja generatora i ,

Q_{Gen_i} reaktivna snaga generisanja generatora i ,

$P_{Gen_i}^{\min}$ i $P_{Gen_i}^{\max}$ donja i gornja granica aktivne snage generisanja generatora i ,

$Q_{Gen_i}^{\min}$ i $Q_{Gen_i}^{\max}$ donja i gornja granica reaktivne snage generisanja generatora i ,

N_{Gen} broj generatora u sistemu.

Optimalni tokovi snaga

Model

- Ograničenje po bilansu aktivnih i reaktivnih u svakom čvoru (jednačine tokova snaga):

$$\Delta P_i = P_i - G_{ii}U_i^2 - \sum_{k=1, k \neq i}^N U_i U_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$\Delta Q_i = Q_i + B_{ii}U_i^2 - \sum_{k=1, k \neq i}^N U_i U_k [G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)] = 0$$

- Ograničenja po tokovima aktivne i reaktivne snage po granama:

$$P_{Gr_j}^{\min} \leq |P_{Gr_j}| \leq P_{Gr_j}^{\max}, \quad j = 1, \dots, N_{Gr}$$

$$Q_{Gr_j}^{\min} \leq |Q_{Gr_j}| \leq Q_{Gr_j}^{\max}, \quad j = 1, \dots, N_{Gr}$$

gde je

P_{Gr_j} tok aktivne snaga po grani j ,

Q_{Gr_j} tok reaktivne snaga po grani j ,

$P_{Gr_j}^{\min}$ i $P_{Gr_j}^{\max}$ donja i gornja granica toka aktivne snage po grani j ,

$Q_{Gr_j}^{\min}$ i $Q_{Gr_j}^{\max}$ donja i gornja granica toka reaktivne snage po grani j ,

N_{Gr} broj grana u mreži.

Optimalni tokovi snaga

Model

- Ograničenja po modulima napona u čvorovima:

$$U_k^{\min} \leq U_k \leq U_k^{\max}, k = 1, \dots, N$$

gde je

U_k moduo napona u čvoru k ,

U_k^{\min} i U_k^{\max} donja i gornja granica modula napona u čvoru k ,

N broj čvorova u mreži.

Optimalni tokovi snaga

Model

- Prema definiciji, OPF proračun predstavlja statički nelinearni optimizacioni problem u kojem se, prema unapred izabranom kriterijumu, vrši globalna optimizacija pogona elektroenergetskog sistema.
- Imajući u vidu definisanu kriterijumsku funkciju i ograničenja, formalno matematički, problem OPF se može opisati sledećim jednačinama:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \text{p.o.:} \quad & g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0, \\ & h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \geq 0. \end{aligned}$$

gde je:

f – kriterijumska funkcija,

\mathbf{x} – vektor upravljačkih promenljivih,

\mathbf{u} – vektor nepoznatih promenljivih stanja sistema,

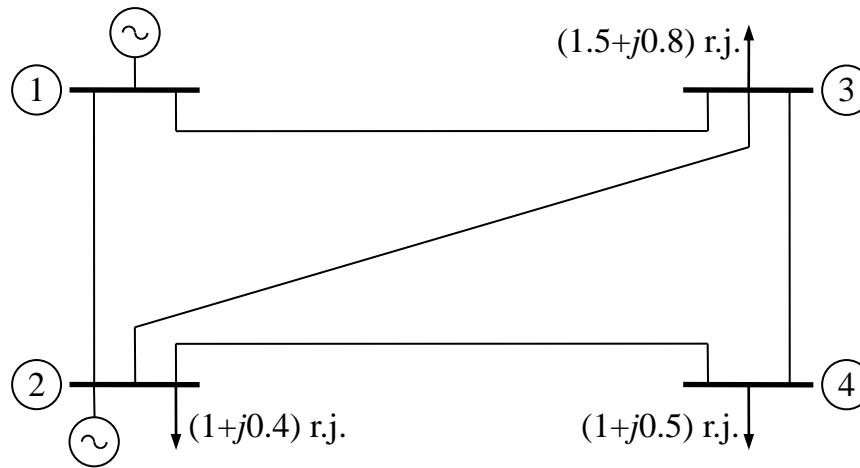
g – ograničenja tipa jednakosti,

h – ograničenja tipa nejednakosti.

Optimalni tokovi snaga

Primer

- OPF proračun biće ilustrovan na jednostavnoj mreži datoj na slici.



- Sistem sa slike ima 4 čvora i 5 grana. Dva čvora su generatorska čvora. Podaci o generatorima u ovim čvorovima dati su u tabeli.

	P_i [MW]	Q_{Gmin} [Mvar]	Q_{Gmax} [Mvar]	α [NJ]	β [NJ/MWh]	γ [NJ/ MW ² h]
G ₁	300	-150.00	150.00	50	3	0.004
G ₂	200	-20.00	80.00	40	2.8	0.003

Optimalni tokovi snaga

Primer

- Pored instalisane snage u tabeli su date i dozvoljene granice po reaktivnoj snazi kao i koeficijenti krive troškova generatora.
- Snaga potrošnje po pojedinim čvorovima data je na slici.
- Parametri za sve grane su isti i iznose $Z_{gr} = (0.01+j0.1)$ r.j.
- Dozvoljeni prenosni kapacitet za sve grane je 300 MVA.
- Za module napona u svim čvorovima usvojene su vrednosti 0.9 r.j. za donju granicu, a 1.1 r.j. za gornju granicu.
- Kao bazne vrednosti u proračunu su usvojene vrednosti $U_B = 220$ kV za napon i $S_B = 100$ MVA za snagu.

Optimalni tokovi snaga

Primer

- U ovom primeru kao kriterijum optimizacije uzeti su ukupni troškovi proizvodnje u elektranama. Ova kriterijumska funkcija je data sledećom jednačinom:

$$f = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} F_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{N_{Gen}} \alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2$$

gde su:

F_i – troškovi proizvodnje elektrane u čvoru i ,

P_{Gi} – snaga generisanja elektrane u čvoru i ,

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – koeficijenti kvadratne krive troškova elektrane u čvoru i ,

N_G – ukupan broj generatorskih čvorova u sistemu.

Optimalni tokovi snaga

Primer

- Kod proračuna uvažena su sva relevantna ograničenja kako bi dobijeno rešenje imalo fizički smisao.
- Od ograničenja tipa jednakosti uvažene su balansne jednačine po aktivnim i reaktivnim injekecijama u svim čvorovima sistema.
- Od ograničenja tipa nejednakosti uvažena su ograničenja po granicama za aktivne i reaktivne snage generisanja u generatorskim čvorovima, po granicama za module napona u svim čvorovima i po dozvoljenim prenosnim kapacitetima svih grana u sistemu.
- Postavljeni OPF problem može se rešiti različitim metodama. Ovde će dati primer biti rešen primenom Genetičkog algoritma.

Optimalni tokovi snaga (*Optimal Power Flow - OPF*)

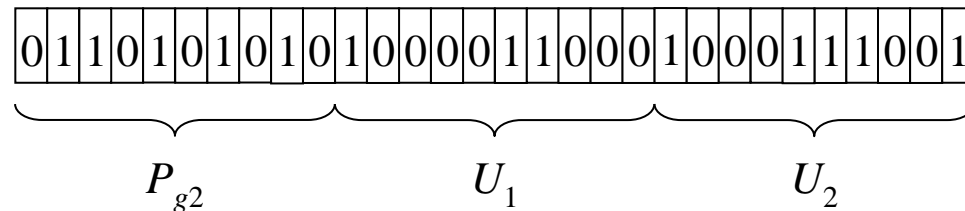
Genetički algoritam (GA)

- Pošto u datom sistemu postoje dva generatorska čvora to znači da postoje 3 upravljačke promenljive.
- To su moduli napona u generatorskim čvorovima 1 i 2 (U_1 i U_2) i aktivna snaga generisanja u čvoru 2 (P_{G2}).
- Čvor 1 je usvojen kao referentni čvor pa aktivna snaga generisanja u ovom čvoru balansira ostale aktivne snage kao i aktivne snage gubitaka.
- Prema tome ova aktivna snaga generisanja zavisi od vrednosti upravljačkih promenljivih i kao takva dobiće se kao rezultat proračuna tokova snaga za svako od razmatranih rešenja.
- Upravljačke veličine kod primene genetičkog algoritma kodirane su sa 10 bita što znači da one mogu uzeti 1024 različite vrednosti unutar njihovog dozvoljenog opsega.
- S obzirom na broj upravljačkih promenljivih jedan hromozom ima ukupno 30 bita. Svaki hromozom ima 3 stringa od po 10 bitova, za svaku promenljivu po jedan.

Optimalni tokovi snaga (*Optimal Power Flow - OPF*)

Genetički algoritam (GA)

- Jedan mogući hromozom prikazan je na slici:



- Pošto za aktivnu snagu P_{G2} važi $0 \leq P_{G2} \leq 200$ to znači da string 0000000000 odgovara vrednosti snage od 0 MW, a string 1111111111 vrednosti snage od 200 MW.
- Takođe, za napone važi da string 0000000000 odgovara vrednosti od 0.9 r.j., a string 1111111111 vrednosti od 1.1 r.j.

Optimalni tokovi snaga (*Optimal Power Flow - OPF*)

Genetički algoritam (GA)

- Potrebno je naglasiti da svaki hromozom u proračunu ujedno predstavlja i potencijalno rešenje optimizacionog problema.
- Proračun je izvršen sa populacijom od 20 hromozoma.
- Proračun je tekao na sledeći način.
- Najpre je formirana početna populacija sa hromozomima.
- Za svaki hromozom iz populacije, odnosno za svaku kombinaciju upravljačkih veličina koja se dekodiranjem dobija iz hromozoma, izvršen je proračun tokova snaga primenom Njutn–Rafsonovog iterativnog postupka za proračun tokova snaga.
- Na osnovu dobijenih rezultata izračunate su vrednosti kriterijumske funkcije, odnosno fitnes funkcije za sve hromozome iz populacije.
- Primenom genetičkih operatora selekcije, ukrštanja i mutacije formirana je populacija u narednoj generaciji proračuna.
- Proračun je na taj način tekao iz generacije u generaciju. Ukupno je izvršeno 200 generacija.

Optimalni tokovi snaga (*Optimal Power Flow - OPF*)

Genetički algoritam (GA)

- Radi verifikacije dobijenih rezultata isti ovaj proračun izvršen je primenom računarskog programa PSAT („*Power System Analysis Toolbox*“).
- Kod ovog programa OPF proračun se vrši formiranjem proširene Lagranžove kriterijumske funkcije uvođenjem Lagranžovih multiplikatora.
- Dobijeni sistem jednačina rešava se Njutnovom iterativnom metodom.
- Rezultati dobijeni ovom metodom mogu se smatrati kao referentni podaci za OPF proračun. U tabeli su dati rezultati proračuna za obe optimizacione metode.

	U_1 [r.j.]	U_2 [r.j.]	P_{G1} [MW]	P_{G2} [MW]	Q_{G1} [Mvar]	Q_{G2} [Mvar]	f [NJ/h]
GA	1.1	1.058	153.08	200.00	120.83	79.94	1322.96
PSAT	1.1	1.058	153.08	200.00	120.76	80.00	1322.98

Optimalni tokovi snaga (*Optimal Power Flow - OPF*)

Genetički algoritam (GA)

- Pored vrednosti upravljačkih promenljivih (U_1 , U_2 i P_{G2}) u tabeli su date vrednosti za snagu generisanja u čvoru 1 (P_{G1}), kao i reaktivne snage generisanja u generatorskim čvorovima (Q_{G1} i Q_{G2}).
- U poslednjoj koloni tabele date su optimalne vrednosti kriterijumske funkcije
- Na osnovu rezultata iz tabele vidi se da su dobijeni rezultati primenom dve različite metode gotovo identični.
- Može se uočiti da je moduo napona u čvoru 1 na svojoj gornjoj granici.
- Takođe, aktivna snaga generisanja u čvoru 2 se nalazi na svojoj gornjoj granici.
- To znači da je generator u čvoru 2 jeftiniji pa je angažovan sa maksimalnom snagom.
- U proračunu je dobijeno i da je reaktivna snaga generisanja u čvoru 2 na svojoj gornjoj granici.

Optimalni tokovi snaga (*Optimal Power Flow - OPF*)

Genetički algoritam (GA)

- U narednoj tabeli dati su i tokovi snaga po pojedinim granama.
- Iz tabele se vidi da nije došlo da narušavanja ograničenja po prenosnom kapacitetu pojedinih vodova.

Grana $i-j$	P_{ij} [MW]	Q_{ij} [Mvar]
1-2	44.61	42.26
1-3	108.47	78.57
2-3	62.6	32.77
2-4	81.69	46.31
3-4	19.14	12.05