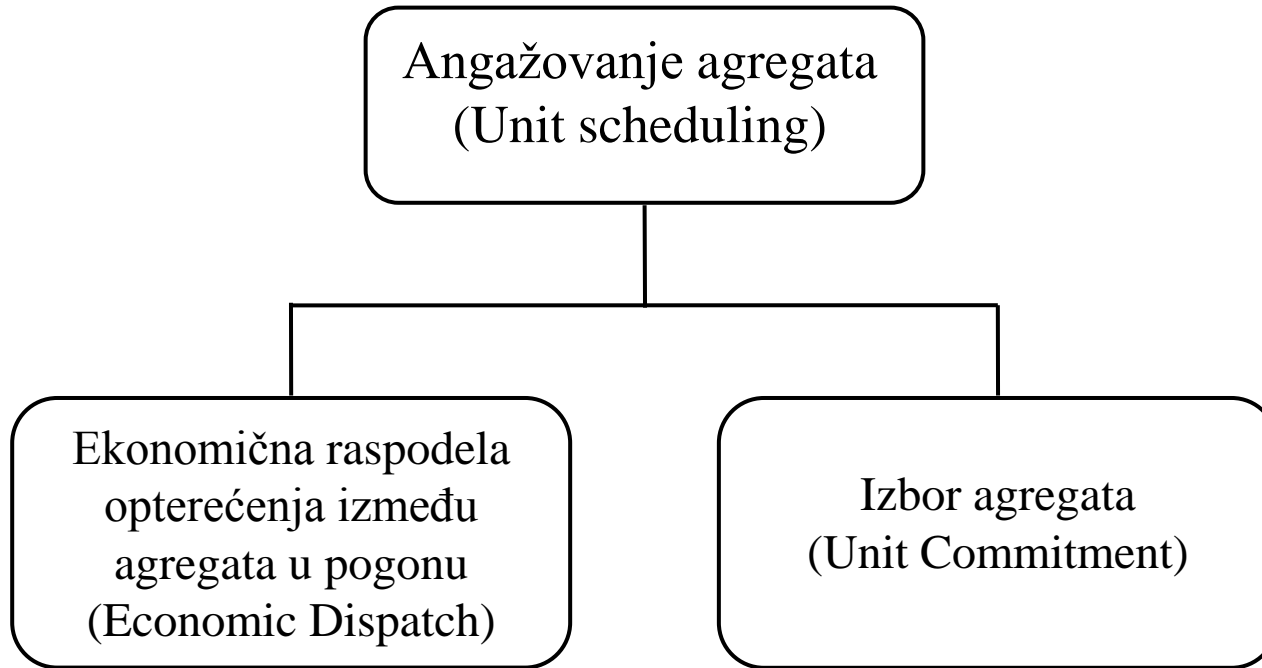


Eksploatacija EES-a

Ekonomski proračuni u eksploataciji
elektroenergetskih sistema
(Ekonomski dispečing i izbor agregata)

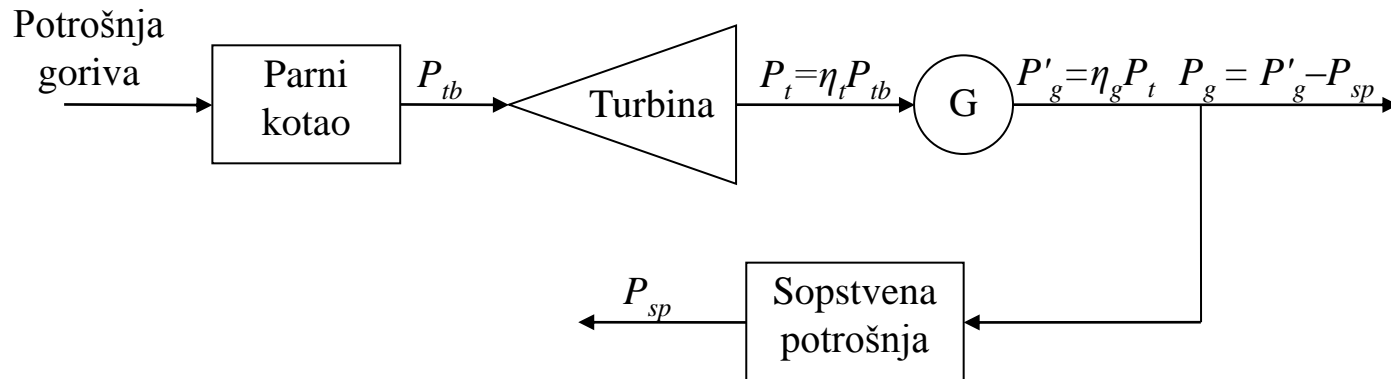
Ekonomski proračuni



Ekonomski dispečing

Energetske karakteristike termoelektrana

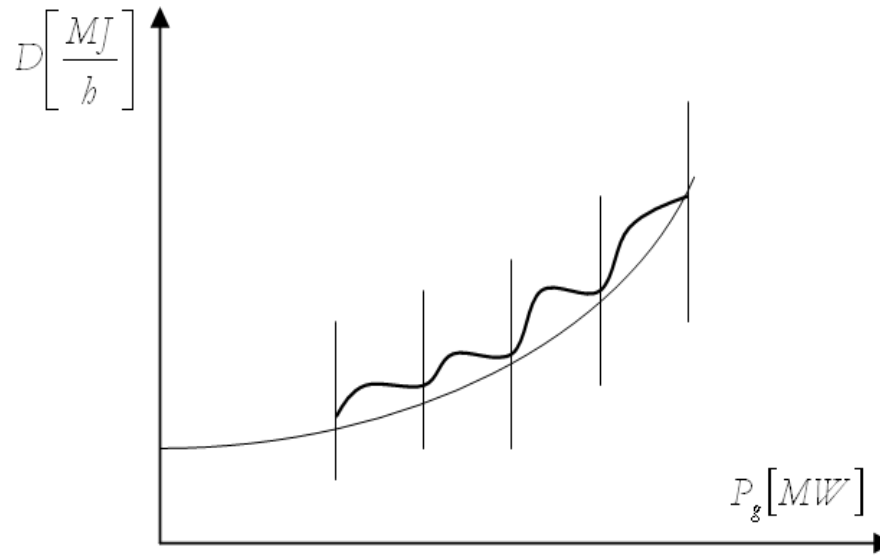
- Šematski prikaz termičkog bloka za dobijanje osnovne energetske karakteristike



Ekonomski dispečing

Energetske karakteristike termoelektrana

- Osnovna ulazno-izlazna karakteristika termičkog agregata



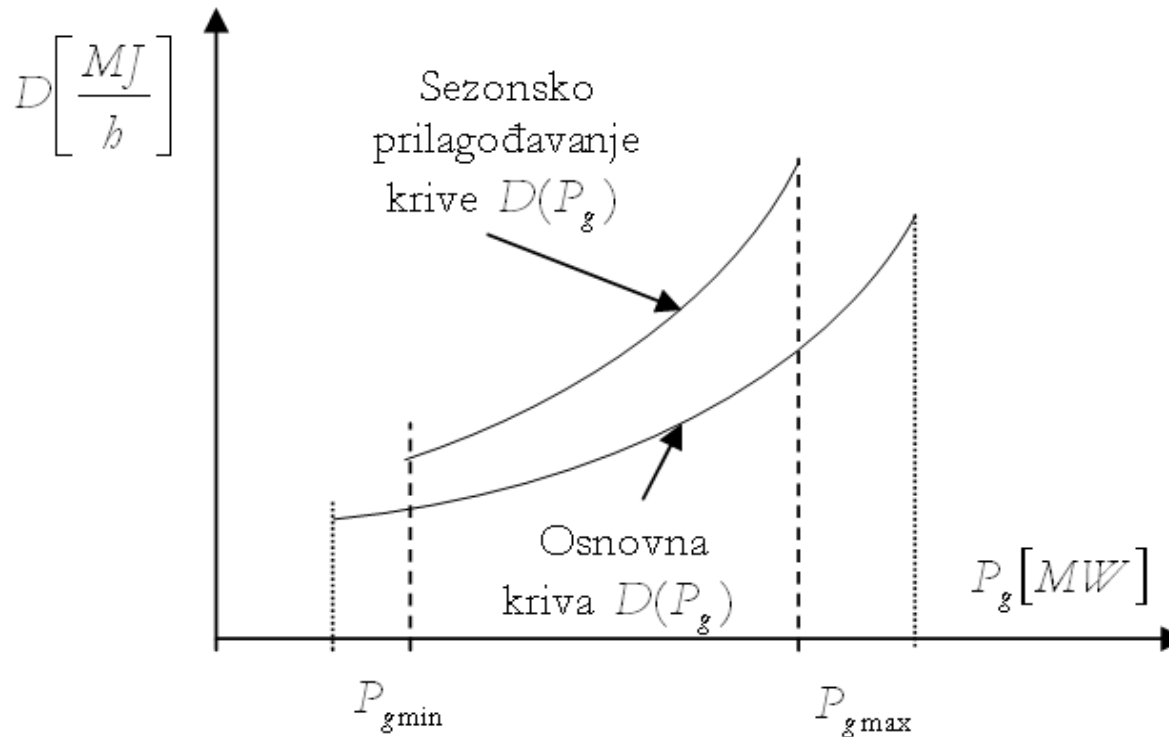
- Obično se ova kriva sa dovoljnom tačnošću aproksimuje polinomom drugog reda

$$D(P_g) = \alpha + \beta \cdot P_g + \gamma \cdot P_g^2$$

Ekonomski dispečing

Energetske karakteristike termoelektrana

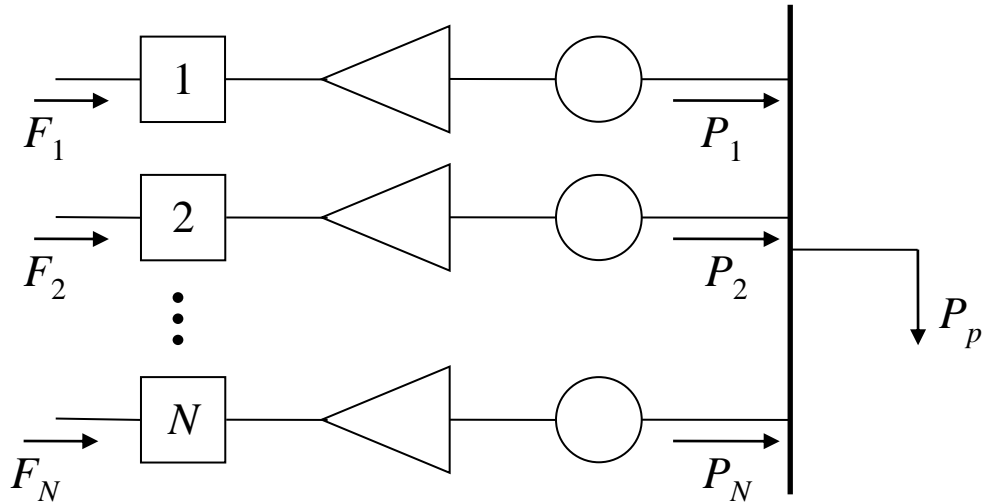
- Aktualizacija ulazno-izlazne karakteristike termičkog agregata



Ekonomski dispečing

Definicija problema

- Šema sistema od N termoelektrana data je na slici



Ekonomski dispečing

Definicija problema

- Može se definisati optimizacioni problem.
- Potrebno je naći minimum troškova svih agregata uz zadovoljenje potrošnje.
- Optimizacioni problem može se opisati funkcijom cilja (kriterijumska funkcija) i funkcijom ograničenja.
- Kriterijumska funkcija:

$$F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_N = \sum_{i=1}^N F_i(P_i)$$

- Funkcija ograničenja:

$$\phi = 0 = P_p - \sum_{i=1}^N P_i$$

Ekonomski dispečing

Definicija problema

- Postavljeni optimizacioni problem najlakše se rešava primenom Lagranžovih multiplikatora.
- Formira se proširena (Lagranžova) funkcija

$$L = F_T + \lambda\phi$$

- Uslovi egzistenije minimuma dobijaju se diferenciranjem funkcije L po nepoznatim promenljivim.

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0, \quad i = 1, \dots, N$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

Ekonomski dispečing

Definicija problema

- Potpun sistem jednačina i ograničenja za proračun ekonomskog dispečinga:

$$\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0, \quad i = 1, \dots, N$$

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}, \quad i = 1, \dots, N$$

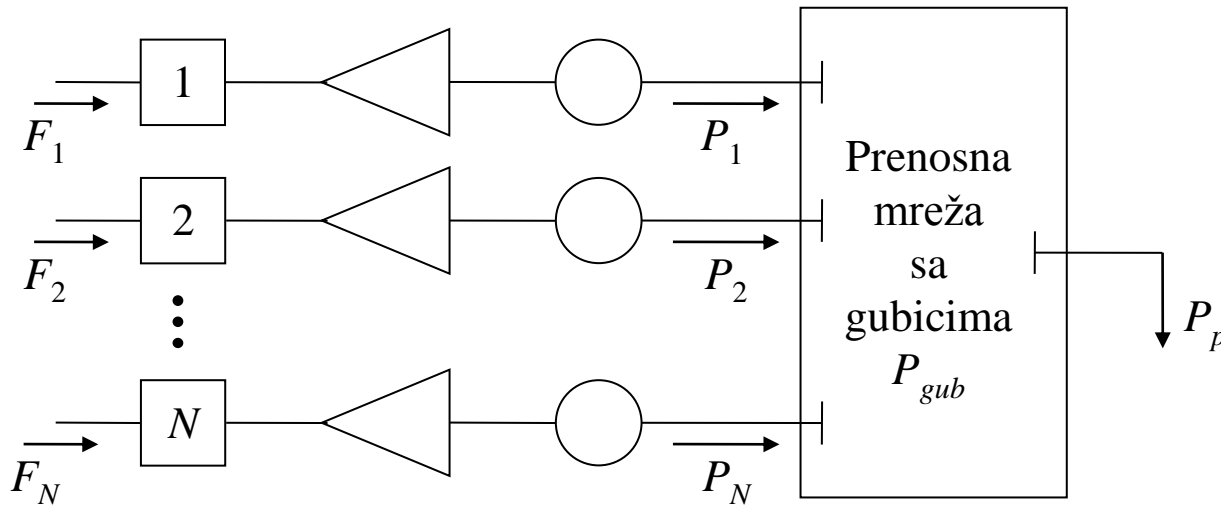
$$P_p = \sum_{i=1}^N P_i$$

- Lagranžov multiplikator λ pored matematičkog ima i fizički smisao. On predstavlja inkrementalni ili diferencijalni trošak generatorske jedinice.
- Prema definiciji, inkrementalni trošak je trošak proizvodnje dodatnog MWh.

Ekonomski dispečing

Definicija problema

- Problem ekonomskog dispečinga može da se proširi tako što se u razmatranje uzmu i gubici u prenosu.



Ekonomski dispečing

Definicija problema

- U ovom slučaju kriterijumska funkcija ostaje ista dok se funkcija ograničenja menja.

$$P_p + P_{gub} - \sum_{i=1}^N P_i = \phi = 0$$

gde su gubici funkcija aktivnih snaga generisanja

$$P_{gub} = f(P_1, P_2, \dots, P_N)$$

- Nakon formiranja Lagranžove funkcije i njenim diferenciranjem po aktivnim snagama generisanja dobija se:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_{gub}}{\partial P_i} \right) = 0$$
$$\frac{1}{1 - \frac{\partial P_{gub}}{\partial P_i}} \cdot \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \lambda \Rightarrow H_i \cdot \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \lambda$$

Ekonomski dispečing

Definicija problema

- Jedan od problema ekonomskog dispečinga je kako u proračun uključiti gubitke u prenosnoj mreži P_{gub} .
- U slučaju sistema sa skoncentrisanom proizvodnjom i potrošnjom na relativno maloj geografskoj teritoriji ovi gubici mogu se zanemariti.
- Međutim, kod prenosa na velika rastojanja i u slučaju složenih sistema koji pokrivaju velike geografske oblasti gubici u prenosu postaju važan faktor u ekonomiji pogona i moraju se uključiti u proračun.
- Za proračun gubitaka u mreži idealno bi bilo koristiti jednačine tokova aktivnih i reaktivnih snaga sa egzaktnim modelom prenosne mreže.
- Međutim, u slučaju ekonomskog dispečinga aktivnih snaga u realnom vremenu često se zanemaruje efekat tokova reaktivnih snaga tako da se gubici izražavaju samo kao funkcija od aktivnih snaga generatora.
- Taj metod je poznat pod imenom formula gubitaka ili metod B-koeficijenata.

Ekonomski dispečing

Definicija problema

- Najjednostavniji oblik jednačine gubitaka je:

$$P_{gub} = \mathbf{P}_g^T \mathbf{B} \mathbf{P}_g = \sum_{i=1}^M B_{ii} P_{gi}^2 + \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M P_{gi} B_{ij} P_{gj}$$

gde je:

\mathbf{B} – matrica koeficijenata gubitaka dimenzije $M \times M$,

\mathbf{P}_g – vektor aktivnih snaga generisanja generatora dimenzije $M \times 1$,

B_{ii} – koeficijenti gubitaka,

P_{gi} – aktivna snaga generisanja generatora i ,

M – broj generatorskih čvorova u sistemu.

- B koeficijenti se računaju za zadato stanje sistema odgovarajućim postupkom. Tako dobijeni koeficijenti važe u okolini tog radnog stanja.
- Za potrebe proračuna ekonomskog dispečinga obično se izračuna nekoliko setova ovih koeficijenata koji se onda koriste prema odgovarajućem radnom stanju.

Ekonomski dispečing

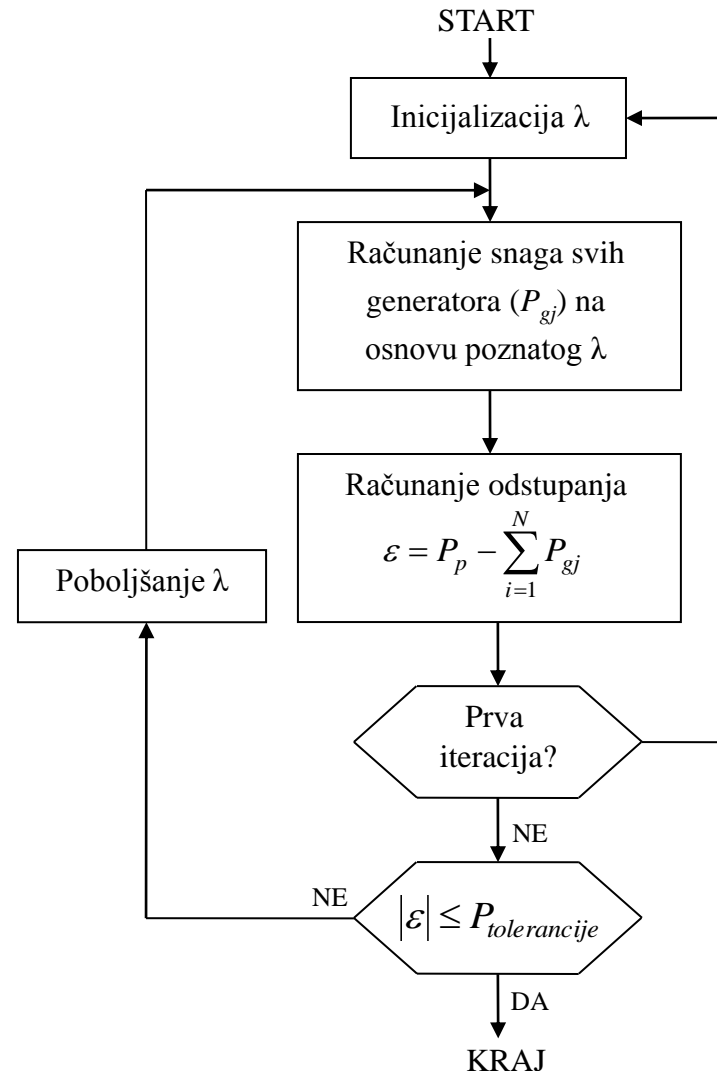
Metode za rešavanje problema ekonomskog dispečinga

- λ – iterativni metod
- Gradijentni metod
- Linearno programiranje (LP)
- Newton-ov metod
- Dinamičko programiranje
- Lagrange-ov relaksacioni metod

Ekonomski dispečing

λ – iterativni metod

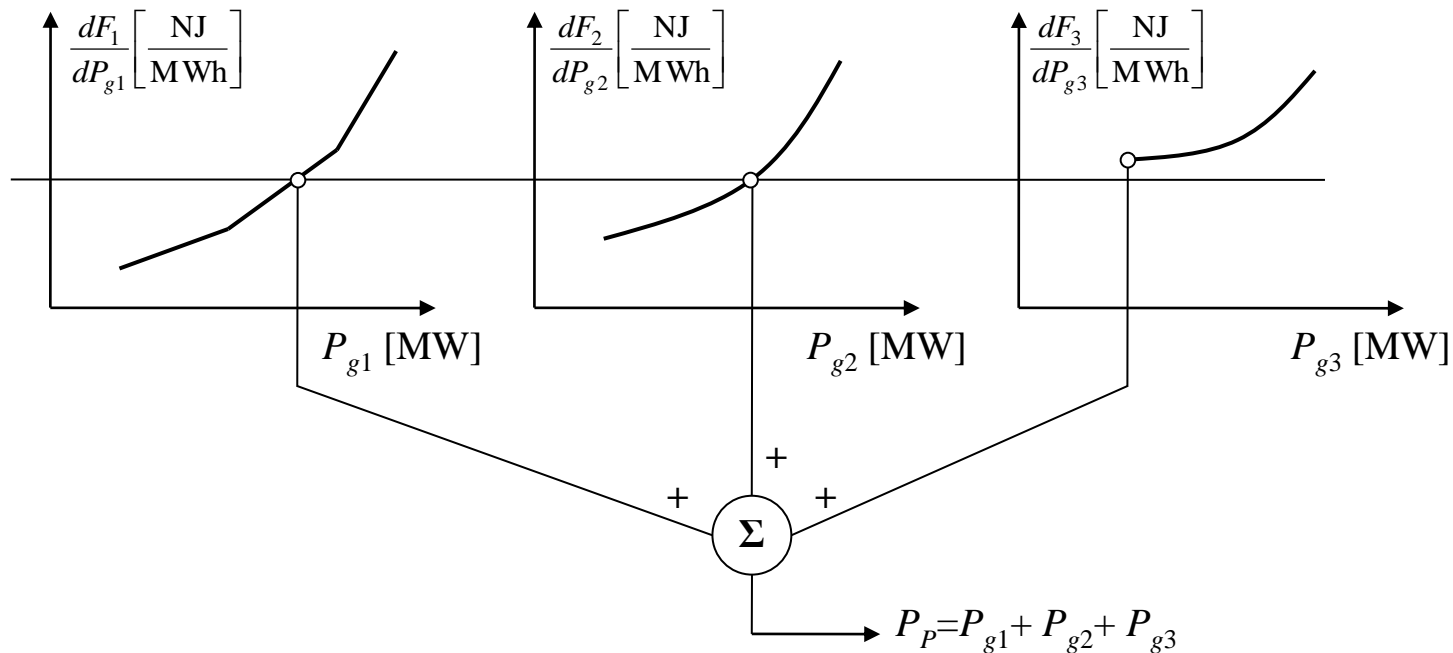
- Algoritam za ovu metodu dat je na slici.
- Metoda se može primeniti kada se zanemare gubici u prenosu.
- Za rešenje ovog problema prvo će se primeniti grafički pristup.
- To se može proširiti na kompjuterski algoritam.



Ekonomski dispečing

λ – iterativni metod

- Neka je dat sistem sa tri agregata. Potrebno je pronaći optimalnu radnu tačku. Jedan pristup je da se karakteristike inkrementalnih troškova za svaku od tri jedinice nacrtaju na istom grafiku, kao što je dato na slici.



Ekonomski dispečing

λ – iterativni metod

- Procedura nalaženja optimalne radne tačke počinje izborom početne vrednosti inkrementalnih troškova λ .
- Na osnovu preseka prave koja odgovara odabranoj vrednosti λ dobijaju se vrednosti izlaznih snaga svake od tri jedinice.
- Na osnovu dobijenih snaga računa se greška (odstupanje) prema izrazu:

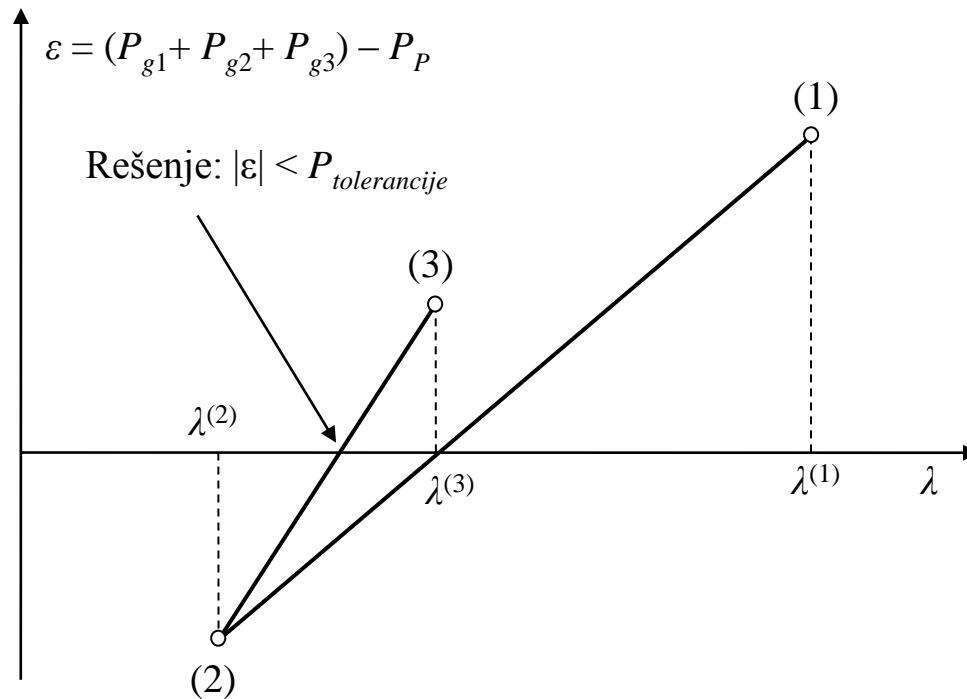
$$\varepsilon = (P_{g1} + P_{g2} + P_{g3}) - P_P$$

- Logično je da prva procena za λ neće biti tačna.
- Ako je pretpostavljena vrednost inkrementalnog troška λ takva da je ukupna izlazna snaga preniska, mora se povećati vrednost za λ i pokušati sa drugim rešenjem.
- Sa dva pretpostavljena rešenja može se primeniti ekstrapolacija (ili interpolacija) da bi se približili željenoj vrednosti ukupne snage.

Ekonomski dispečing

λ – iterativni metod

- Prikaz ažuriranja vrednosti za λ dat je na slici.
- Kod ažuriranja koristi se princip interpolacije



Ekonomski dispečing

λ – iterativni metod

- Isti postupak se može primeniti za kompjuterski algoritam kao što je prikazano na slici.
- Ova procedura je iterativna pa se mora zadati pravilo zaustavljanja.
- Mogu se primeniti dva opšta pravila zaustavljanja.
- Prvo pravilo je prikazano na algoritmu i zasnovano je na pronalaženju odgovarajuće radne tačke unutar određene tolerancije.
- Drugo, koji nije prikazano na algoritmu, odnosi se na unapred zadati maksimalni broj iteracija proračuna.
- Ova procedura konvergira veoma brzo.
- Stvarna računaska procedura je nešto složenija od one koja je prikazana na algoritmu sa slike, pošto je tokom proračuna neophodno poštovati radne granice za svaku od jedinica.

Ekonomski dispečing

Gradijentni metod

- Formira se kriterijumska funkcija

$$L = \sum_{i=1}^N F_i(P_{gi}) + \lambda \left(P_p - \sum_{i=1}^N P_{gi} \right)$$

- Vektor promenljivih je:

$$x = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ \vdots \\ P_{gN} \\ \lambda \end{bmatrix}$$

Ekonomski dispečing

Gradijentni metod

- Izračuna se gradijent kriterijumske funkcije:

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial P_{g1}} \\ \vdots \\ \frac{\partial L}{\partial P_{gN}} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dP_{g1}} F_1(P_{g1}) - \lambda \\ \vdots \\ \frac{d}{dP_{gN}} F(P_{gN}) - \lambda \\ P_p - \sum_{i=1}^N P_{gi} \end{bmatrix}$$

- Ažuriranje promenljivih se vrši preko izraza:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - (\nabla L)\alpha$$

gde je α odgovarajući skalar iz skupa realnih brojeva.

Ekonomski dispečing

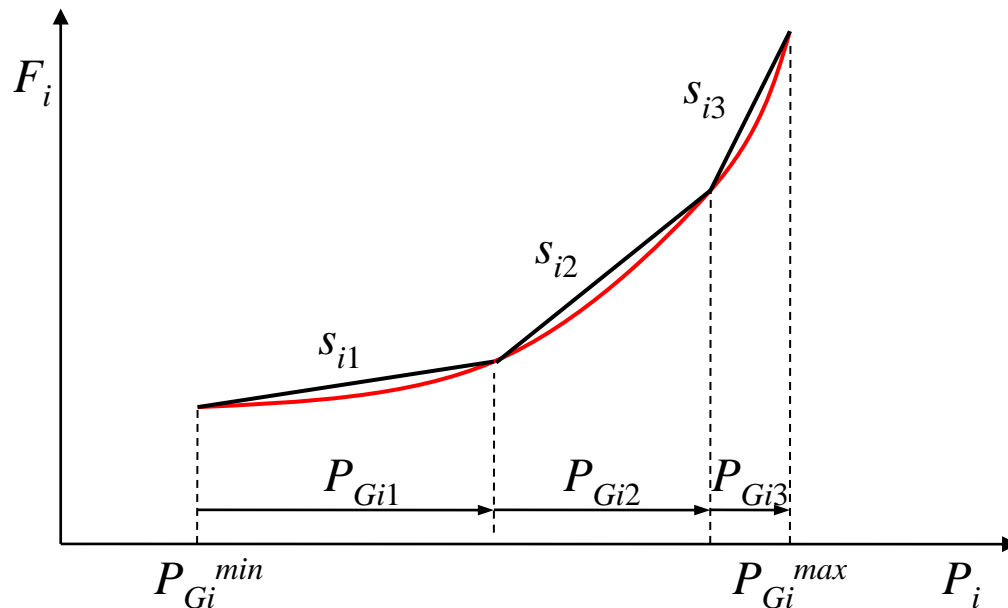
Linearno programiranje

- Linearno programiranje (LP) se veoma dobro snalazi sa problemima koji su modelovani nelinearnim funkcijama.
- Takođe, LP se dobro snalazi i sa ograničenjima nejednakosti sve dok je problem koji treba rešiti takav da se može linearizovati bez gubitka tačnosti.
- U formulaciji koja sledi, pokazaće se kako se problem ekonomskog dispečinga može modelovati kao LP.
- Prvo će se nelinearne ulazno-izlazne ili troškovne funkcije predstaviti kao skup linearnih funkcija.
- Na slici je data nelinearna funkcija troškova aproksimovana sa deo po deo linearnim segmentima.

Ekonomski dispečing

Linearno programiranje

- Radi jednostavnosti aproksimacija je izvršena sa tri segmenta.



- Snaga agregata i (promenljiva P_i) zamenjena je sa tri nove promenljive P_{Gi1} , P_{Gi2} i P_{Gi3} .
- Svaki segment ima svoj nagib označen sa s_{i1} , s_{i2} , s_{i3} (gde je $s_{i1} < s_{i2} < s_{i3}$).

Ekonomski dispečing

Linearno programiranje

- Funkcija troškova može se sada predstaviti kao suma troškova za P_{Gi}^{\min} i linearnih troškova za svaki segment:

$$F(P_{Gi}) = F(P_{Gi}^{\min}) + s_{i1}P_{Gi1} + s_{i2}P_{Gi2} + s_{i3}P_{Gi3}$$

- Pri tome mora da važi:

$$0 \leq P_{Gik} \leq P_{Gik}^{\max}, \quad k = 1, 2, 3$$

- Snaga agregata i je sada

$$P_{Gi} = P_{Gi}^{\min} + P_{Gi1} + P_{Gi2} + P_{Gi3}$$

- Za nagibe pojedinih segmenata važi:

$$s_{ik} = \frac{F(P_{Gi(k+1)}) - F(P_{Gik})}{P_{Gi(k+1)} - P_{Gik}}, \quad k = 1, 2, 3$$

Ekonomski dispečing

Linearno programiranje

- Funkcija troškova je sada linearna funkcija tri promenljive P_{Gi1} , P_{Gi2} i P_{Gi3} .
- Pošto se nagibi iz segmenta u segment povećavaju ($s_{i1} < s_{i2} < s_{i3}$), LP će vrednost P_{Gik} postaviti na limit P_{Gik}^{\max} , pre nego što se vrednost $P_{Gi(k+1)}$ poveća iznad nule.
- Sada se problem ekonomskog dispečinga može napisati u LP formi.

$$\min \sum_{i=1}^{N_G} \left(F(P_{Gi}^{\min}) + s_{i1}P_{Gi1} + s_{i2}P_{Gi2} + s_{i3}P_{Gi3} \right)$$

pod ograničenjima

$$0 \leq P_{Gik} \leq P_{Gik}^{\max}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad i = 1, \dots, N_G$$

$$P_{Gi} = P_{Gi}^{\min} + P_{Gi1} + P_{Gi2} + P_{Gi3}, \quad i = 1, \dots, N_G$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} = P_P$$

Ekonomski dispečing

Primer

- Radi ilustracije prikazaće se rezultati ekonomskog dispečinga na primeru tri agregata.
- Krive troškova kao i mogući radni opsezi pojedinih agregata dati su sledećim izrazima:

$$F_1[\text{NJ/h}] = 30 + 9P_1 + 0.1P_1^2 \quad 50 \text{ MW} \leq P_1 \leq 100 \text{ MW}$$

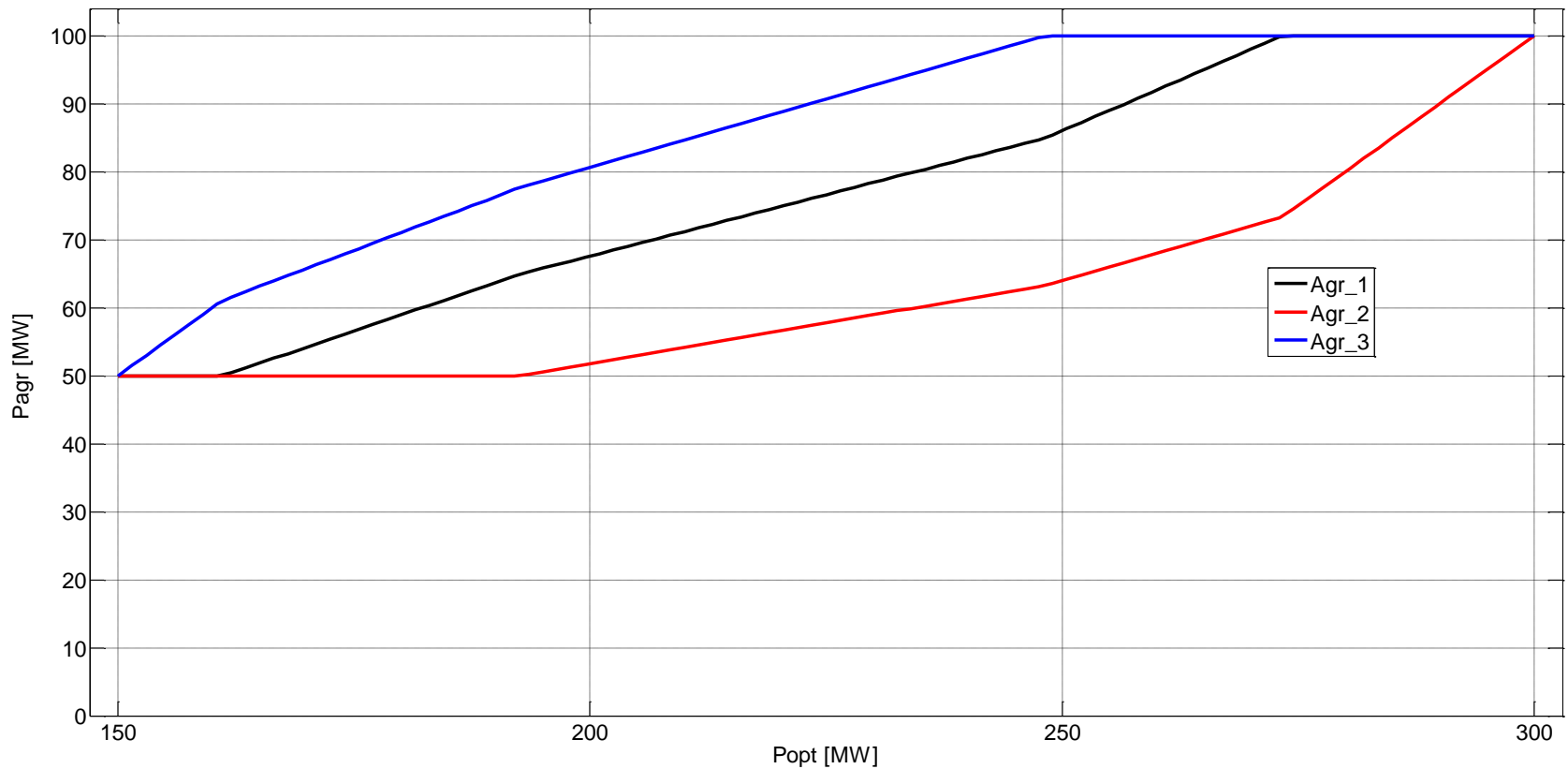
$$F_2[\text{NJ/h}] = 40 + 7P_2 + 0.15P_2^2 \quad 50 \text{ MW} \leq P_2 \leq 100 \text{ MW}$$

$$F_3[\text{NJ/h}] = 35 + 8P_3 + 0.09P_3^2 \quad 50 \text{ MW} \leq P_3 \leq 100 \text{ MW}$$

Ekonomski dispečing

Primer

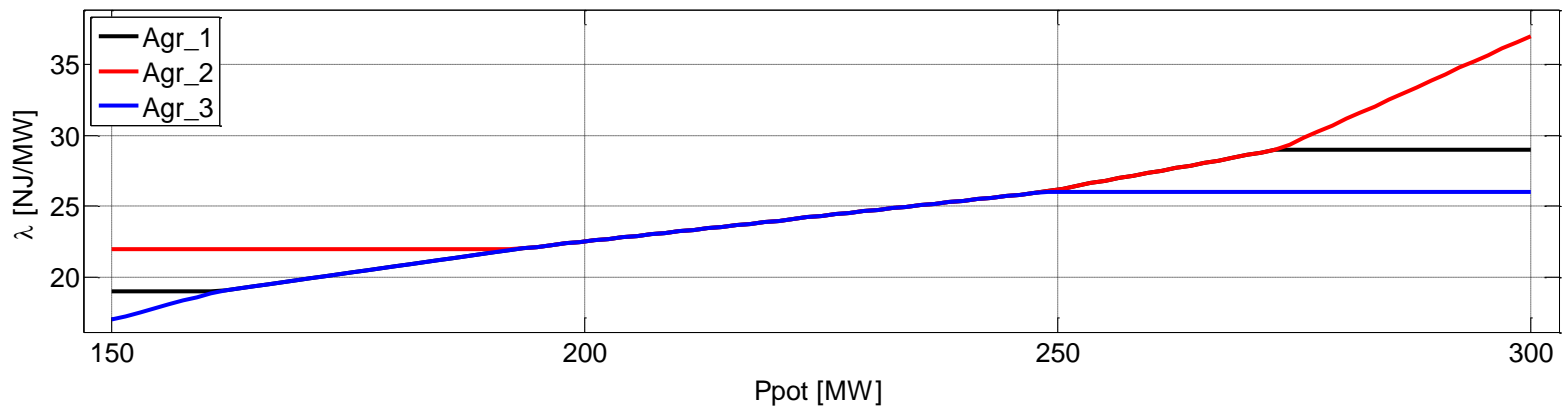
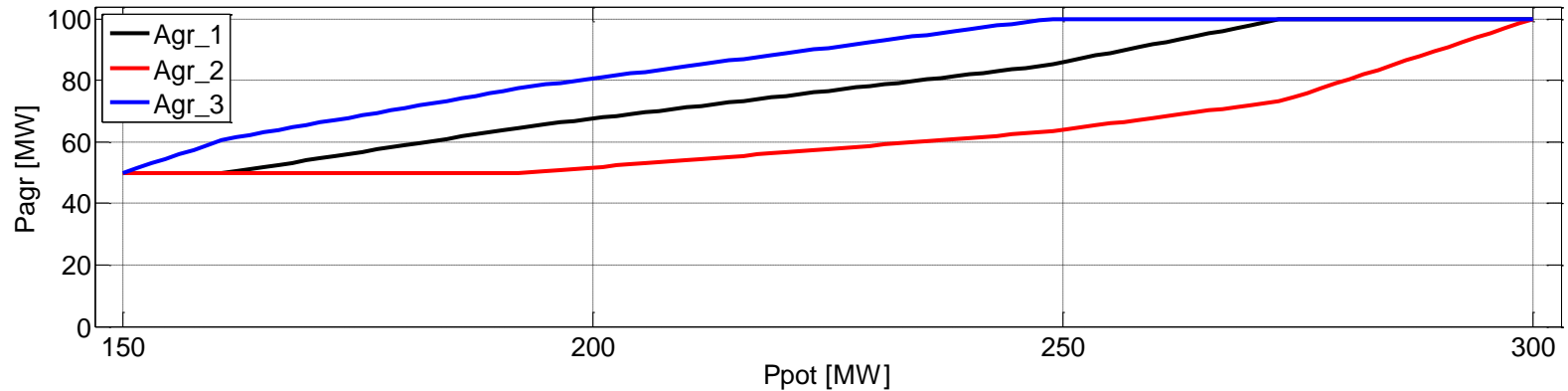
- Rezultat ekonomskog dispečinga za ceo mogući opseg snaga potrošnje dat je na grafiku.



Ekonomski dispečing

Primer

- Na uporednom grafiku date su snage pojedinih agregata i njihovi marginalni troškovi

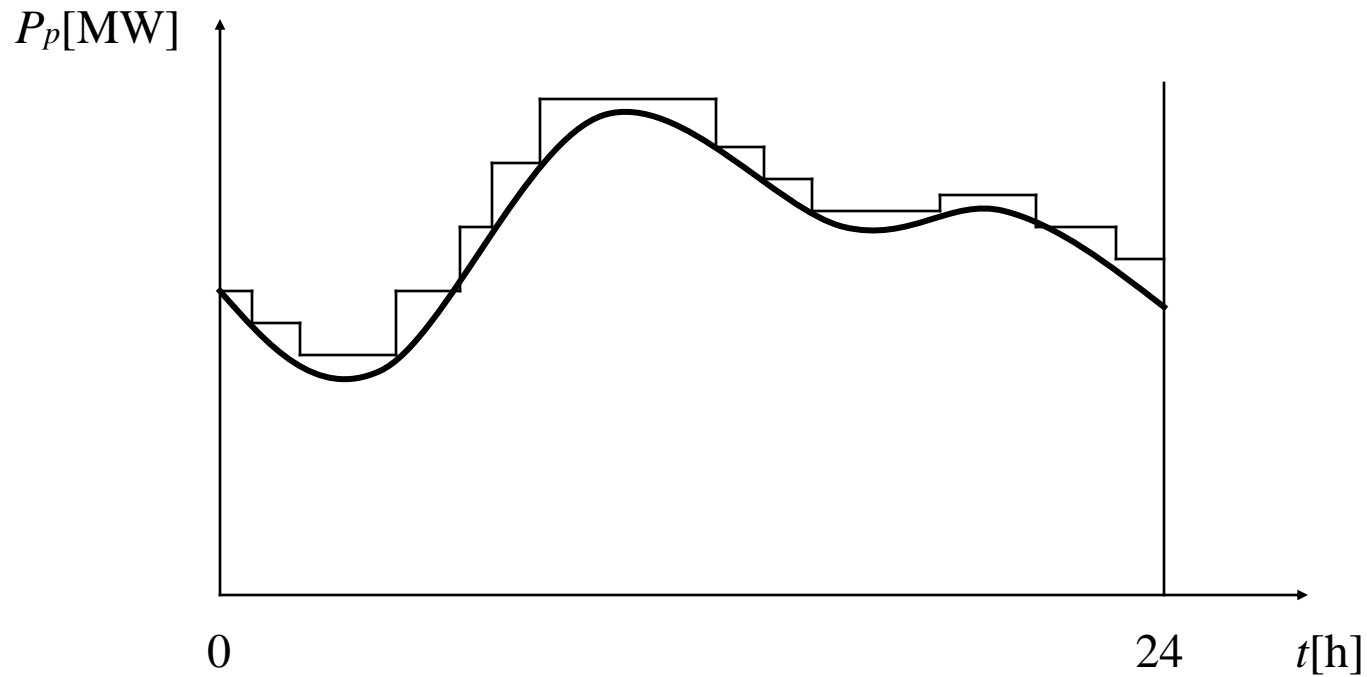


Izbor agregata (Unit Commitment)

- Pošto ljudska aktivnost prati određene cikluse, većina sistema za snabdevanje velikog broju potrošača mora da prati te cikluse.
- To uključuje transportne sisteme, komunikacione sisteme, kao i elektroenergetske sisteme.
- U slučaju elektroenergetskog sistema, ukupno opterećenje sistema će generalno biti veće tokom dana i ranih večernjih sati, a niže tokom kasnih večeri i ranog jutra kada većina stanovništva spava.
- Pored toga, korišćenje električne energije ima nedeljni ciklus jer je opterećenje manje preko vikenda nego u radnim danima.
- Ali zašto je to problem u radu elektroenergetskog sistema? Zašto jednostavno ne uključiti dovoljno jedinica da pokrijete maksimalno opterećenje sistema i ostaviti ih da rade?
- Razlog je ekonomija odnosno troškovi.
- Prilično je skupo pokrenuti previše proizvodnih jedinica. Mnogo novca se može uštedeti isključivanjem jedinica kada nisu potrebne.

Izbor agregata

- Izbor agregata ima za cilj angažovanje agregata kako bi se zadovoljio dijagram opterećenja. Ilustracija je data na slici.



Izbor agregata

- Vrlo je važno ukazati na suštinske razlike između izbora agregata (Unit Commitment - UC) i ekonomskog dispečinga.
- Kod problema ekonomskog dispečinga pretpostavlja se da postoji N_{gen} jedinica koje su već povezane na sistem.
- Svrha problema ekonomskog dispečinga je optimizacija rada za ovih N_{gen} jedinica.
- S druge strane, UC problem je mnogo kompleksniji.
- Kod UC problema pretpostavka je da se na raspolaganju ima N_{gen} jedinica i da se poznaje prognoza potrošnje koju je potrebno zadovoljiti.
- UC problem može se formulirati na sledeći način:

Neka je dat određen broj podskupova kompletnog skupa od N_{gen} proizvodnih jedinica koji mogu da zadovolje očekivanu potrošnju. Naći onaj podskup koji ima minimalne troškove rada?

Izbor agregata

- UC problem obično se rešava za neki vremenski period, na primer 24 sata ili nedelju dana (168 sati).
- UC problem je mnogo teži problem za rešavanje od problema ekonomskog dispečinga (ED).
- Procedure rešavanja uključuju ED problem kao podproblem.
- Drugim rečima, svaki od podskupova ukupnog broja jedinica koji treba da se analizira, treba da radi na optimalan ekonomičan način.
- Ovo će omogućiti pronalaženje minimalnih operativnih troškova za taj podskup, ali ne utvrđuje koji od podskupova je zapravo onaj koji će dati minimalne troškove tokom određenog vremenskog perioda.
- Jedan od glavnih problema sa aspekta rešavanja UC problema je taj što matematički modeli uključuju celobrojne promenljive. To jest, proizvodne jedinice mogu biti uključene ili potpuno isključene.

Izbor agregata

- Na izbor agregata utiču razna ograničenja kao što su:
 - Obrtna rezerva
 - Ograničenja termičkih jedinica
 - Minimalna i maksimalna snaga
 - Maksimalna dozvoljena promena brzina opterećenja
 - Minimalno vreme startovanja i gašenja
 - Maksimalan broj simultanih startovanja generatora
 - Ostala ograničenja
 - Ograničenja usled uticaja hidroelektrana (Hydro Constraints)
 - Agregati koji moraju da budu u pogonu (Must Run Units)
 - Ograničenja u pogledu snabdevanja goriva (Fuel Constraints)
 - Sigurnosna ograničenja...

Izbor agregata

- UC problem je veoma komplikovan za rešavanje. Da bi se to ilustrovalo može se posmatrati sledeća situacija:
 - Analizira se M perioda sa odgovarajućim opterećenjem,
 - Raspolaže se sa N_{gen} jedinica koje se mogu angažovati,
 - M nivoa opterećenja i radna ograničenja N_{gen} jedinica su takvi da bilo koja jedinica može da snabdeva pojedinačna opterećenja i da bilo koja kombinacija jedinica takođe može da snabdeva opterećenja.
- Ako bi se metodom grube sile (brute force) generisala sva potencijalna rešenja onda bi ukupan broj kombinacija koje treba da se analiziraju u svakom periodu M bio:

$$C(N_{gen}, 1) + C(N_{gen}, 2) + \dots + C(N_{gen}, N_{gen} - 1) + C(N_{gen}, N_{gen}) = 2^{N_{gen}} - 1$$

gde je $C(N_{gen}, j)$ broj kombinacija j elemenata na skupu od N_{gen} elemenata:

$$C(N_{gen}, j) = \frac{N_{gen}!}{(N_{gen} - j)! j!}$$

Izbor agregata

- Za period od M intervala maksimalni broj mogućih kombinacija je:

$$\left(2^{N_{gen}} - 1\right)^M$$

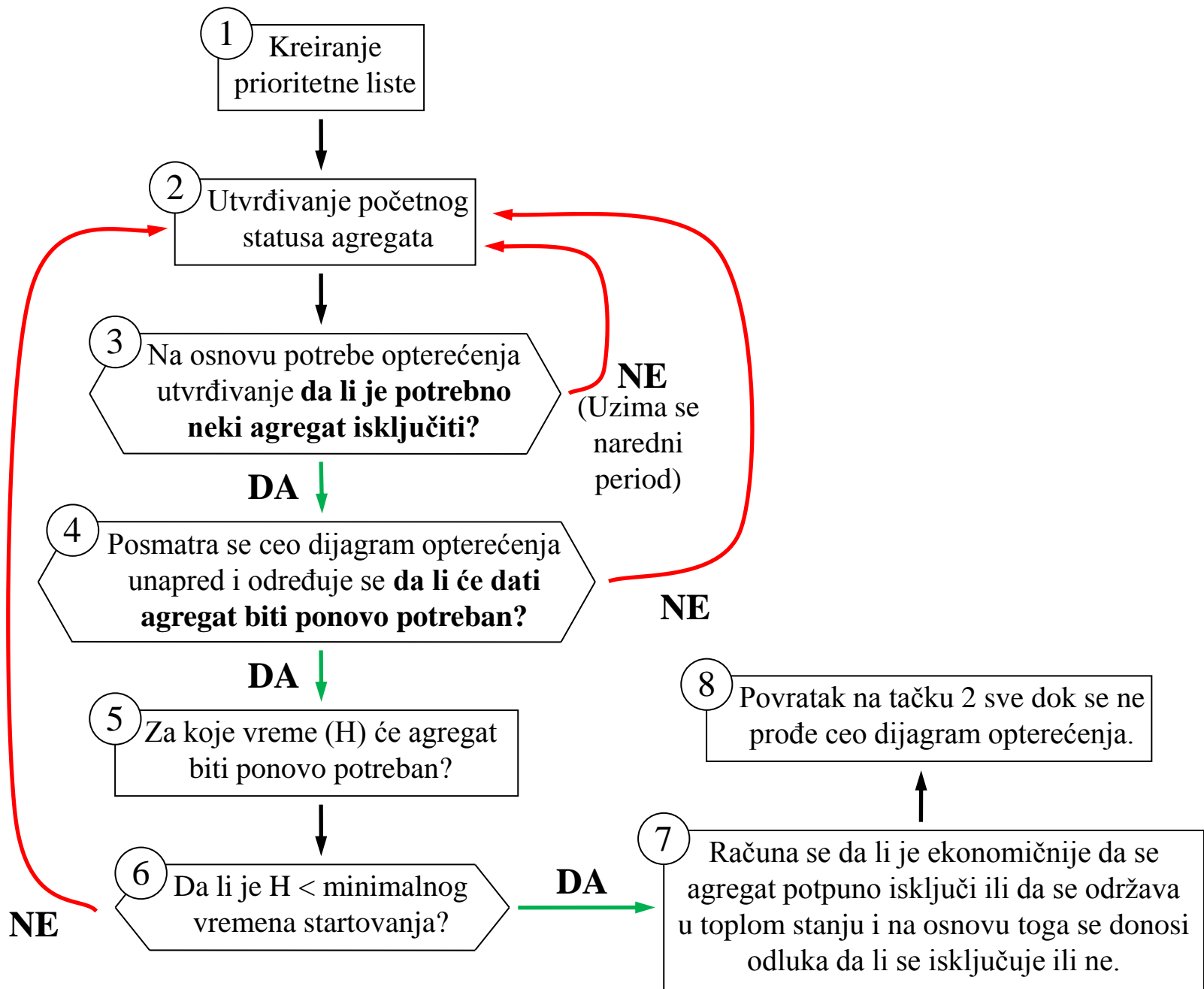
što može da bude ogroman broj.

- Na primer, za period od 24 h sa vremenskim intervalima od jedan sat (24 intervala) i ako se posmatra sistem sa 5, 10, 20 i 40 jedinica broj mogućih kombinacija je dat u tabeli.

N_{gen}	$\left(2^{N_{gen}} - 1\right)^{24}$
5	6.2×10^{35}
10	1.73×10^{72}
20	3.12×10^{144}
40	Suviše veliki

Izbor agregata

- Ovi veoma veliki brojevi su gornje granice za broj potencijalnih rešenja.
- Na sreću, pogonska ograničenja proizvodnih jedinicama kao i ograničenja samog sistema su takva da je realan broj značajno manji.
- Ipak, karakteristika UC problema je velika dimenzionalnost što predstavlja značajnu teškoću prilikom rešavanja.
- Kod izbora agregata primenjuju se različite metode:
 - Metod prioritete liste
 - Metod dinamičkog programiranja (DP)
 - Lagrange-ov relaksacioni metod
 - Metod mešovito linearnog programiranja (MILP)



Podaci o agregatima - primer

Units	Type	P^{\max} [MW]	P^{\min} [MW]	RU [MW/min]	RD [MW/min]	UT [h]	DT [h]
# 1	A	274	160	2	2	8	4
# 2	A	342	180	2	2	8	4
# 3	B	378	200	24	24	4	3
# 4	B	476	250	24	24	4	3
# 5	C	152	63	8	8	1	1

A – Termo agregat na lignit

B – Gasna turbina sa kombinovanim ciklusom (CCGT)

C – Gasna turbina sa otvorenim ciklusom (OCGT)

Units	NLC [€/h]	SUC [€]			SDC [€]	Marginal Cost Range [€/MWh]	
		HOT	WARM	COLD		min	max
# 1	1,894	46,600	64,007	87,217	20,000	29.0	32.0
# 2	1,644	58,165	79,892	108,862	20,000	31.0	34.5
# 3	3,367	16,012	24,832	42,472	10,000	55.0	57.5
# 4	3,839	19,766	30,476	51,896	10,000	55.0	59.0
# 5	965	2,568	2,568	2,568	1000	85.0	95.0

Izvor: C.Simoglou, P. Biskas, A.G. Bakirtzis, Optimal Self-Scheduling of a Thermal Producer in Short-Term Electricity Markets by MILP, IEEE Transactions on Power Systems, 2010.