

*Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*

Οικονομικά Ενέργειας

Μαρία Καρασίμου

Διδάκτορας του Τμήματος

Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
(ΤΗΜΜΥ)

HM554 Εισαγωγή στην Οικονομία της Ενέργειας

Εαρινό Εξάμηνο 2023-2024



Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας Κεντρικές Συναλλαγές



Βασικές αρχές των κεντρικών συναλλαγών

Μια κεντρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αντί να εξαρτάται από τις επαναλαμβανόμενες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των προμηθευτών και καταναλωτών, προκειμένου να επιτευχθεί η ισορροπία, παρέχει έναν συστηματικό τρόπο για τον προσδιορισμό αυτής της ισορροπίας.

Η λειτουργία μίας κεντρικής αγοράς

- Οι εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής υποβάλλουν προσφορές για την παροχή ορισμένης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας σε μία συγκεκριμένη τιμή. Αυτές οι προσφορές ταξινομούνται, σύμφωνα με την τιμή τους, σε αύξουσα σειρά. Από την κατάταξή τους μπορεί να δημιουργηθεί μία καμπύλη που να δείχνει την τιμή προσφοράς σαν συνάρτηση της αθροιστικής ποσότητας που προσφέρεται.

Αυτή η καμπύλη αποτελεί την καμπύλη προσφοράς της αγοράς.

- Η καμπύλη ζήτησης μπορεί να καθοριστεί ζητώντας από τους καταναλωτές να υποβάλλουν προσφορές. Καθορίζεται η ποσότητα που χρειάζονται και η τιμή που είναι πρόθυμοι να πληρώσουν. Οι προσφορές ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά. Επειδή η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξαιρετικά ανελαστική, αυτό το βήμα παραλείπεται.

Η ζήτηση καθορίζεται χρησιμοποιώντας μία πρόβλεψη για το φορτίο.

Άρα, η καμπύλη ζήτησης θεωρείται ότι είναι μία κάθετη γραμμή στην τιμή του προβλεπόμενου φορτίου.

- Η τομή των καμπυλών ζήτησης και προσφοράς καθορίζει το σημείο ισορροπίας της αγοράς. Όλες οι τιμές πώλησης που υποβάλλονται σε τιμή χαμηλότερη ή ίση με την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς γίνονται αποδεκτές. Όλες οι προσφορές αγοράς που υποβάλλονται σε τιμή μεγαλύτερη ή ίση με την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς γίνονται αποδεκτές.
- Η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς αντιπροσωπεύει την τιμή μίας επιπλέον μεγαβατώρας ενέργειας και ονομάζεται «οριακή τιμή συστήματος» (ΟΤΣ)

- Η διαδικασία εύρεσης του σημείου τομής των καμπυλών προσφοράς και ζήτησης ουσιαστικά προσομοιώνει τον τρόπο λειτουργίας μίας αγοράς.

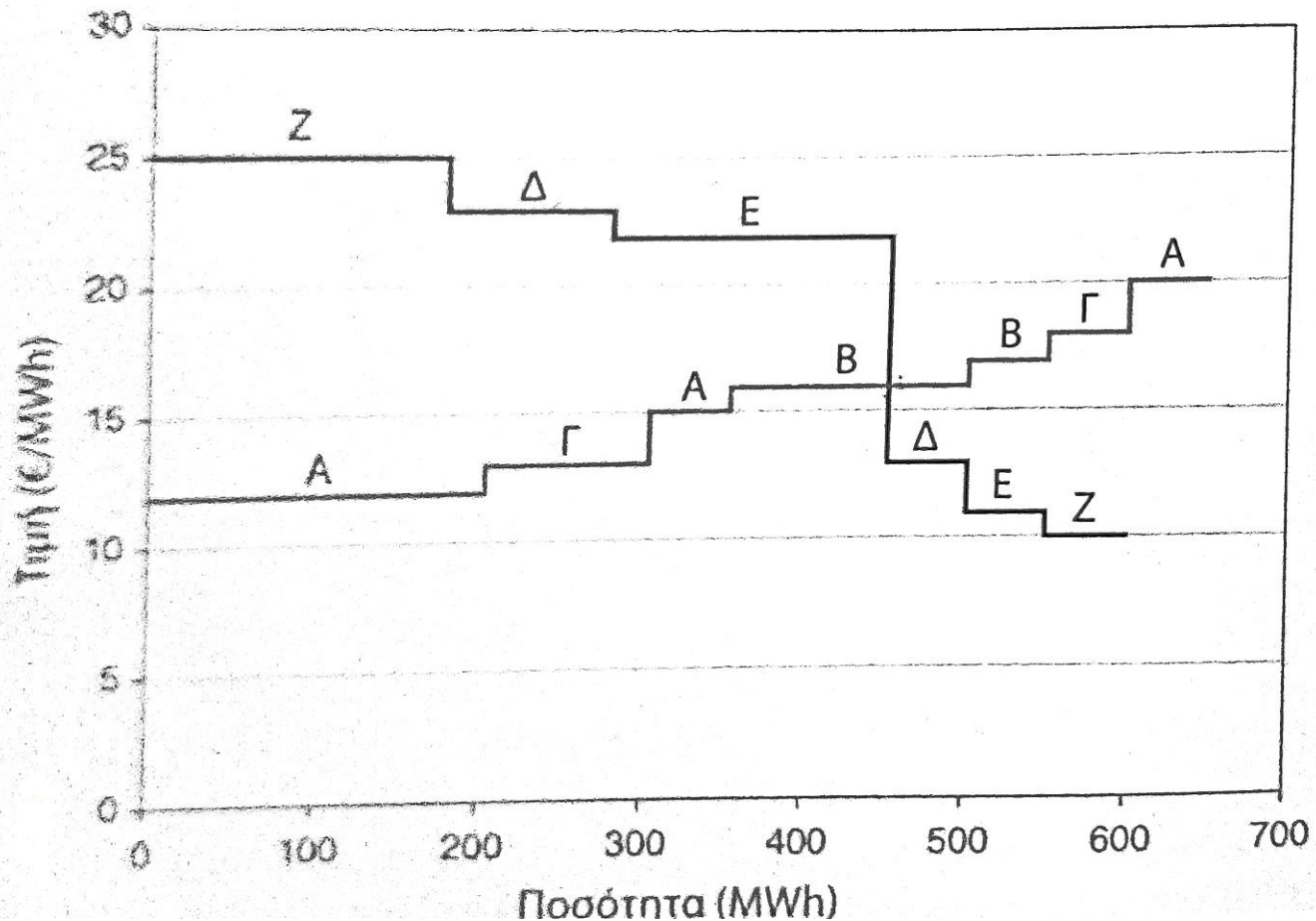
Όταν η ζήτηση θεωρείται σταθερή και οι προσφορές αντικατοπτρίζουν το οριακό κόστος παραγωγής, τότε η κεντρική αγορά εκτελεί μία οικονομική κατανομή φορτίου, δηλαδή καθορίζει την ποσότητα που πρέπει να παράγει κάθε γεννήτρια, προσκειμένου το συνολικό φορτίο να καλυφθεί με το ελάχιστο κόστος.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Προσφερόμενες τιμές αγοράς και πώλησης στην κεντρική αγορά

11 Ιουνίου 09:00-10:00	Εταιρεία	Ποσότητα (MW)	Τιμή (€/MWh)
Προσφερόμενη τιμή πώλησης	A	200	12.00
	A	50	15.00
	A	50	20.00
	B	150	16.00
	B	50	17.00
	Γ	100	13.00
	Γ	50	18.00
Προσφερόμενη τιμή αγοράς	Δ	50	13.00
	Δ	100	23.00
	Ε	50	11.00
	Ε	150	22.00
	Z	50	10.00
	Z	200	25.00

Άθροιση προσφορών αγοράς και πώλησης



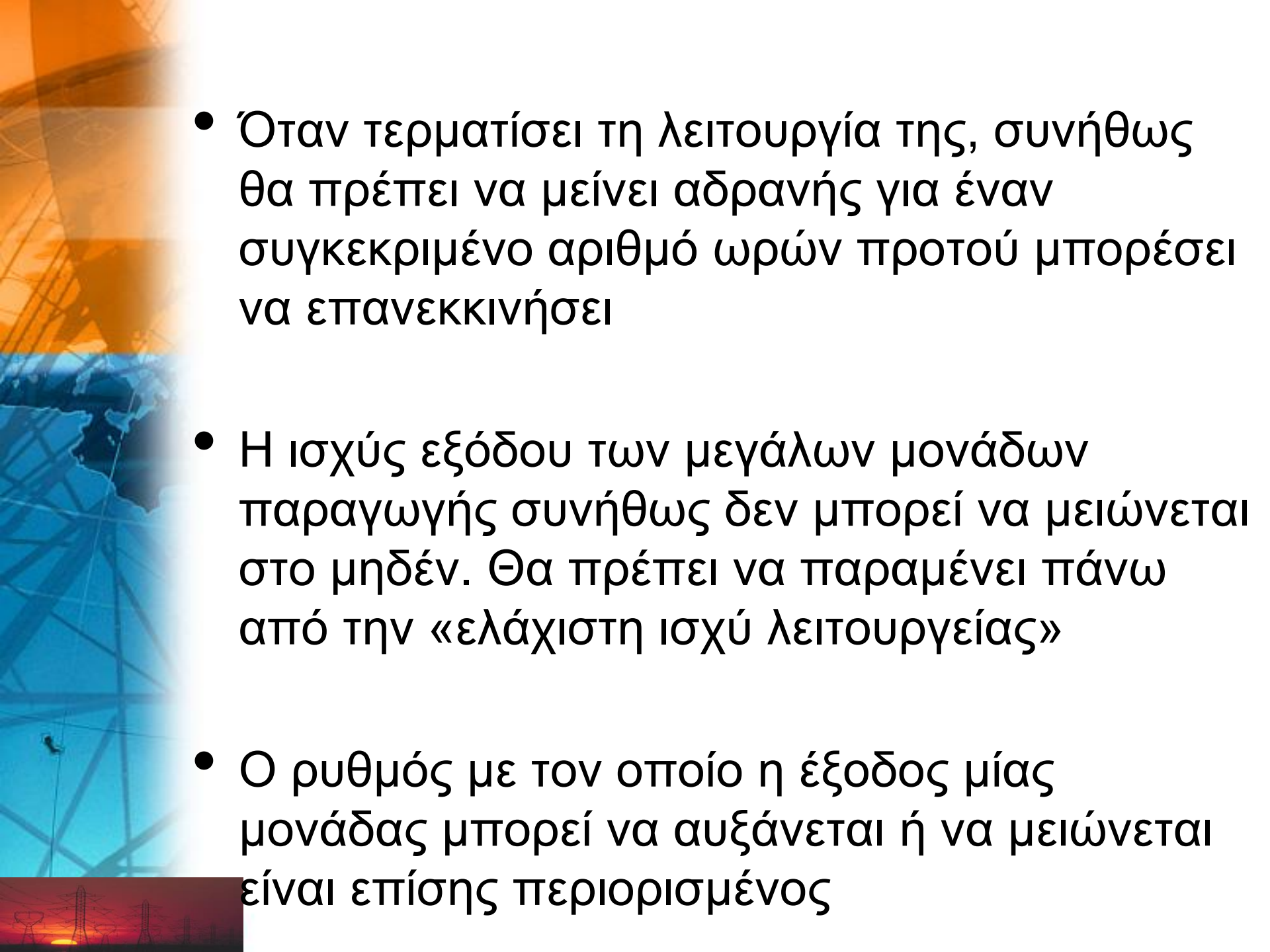
Το πρόγραμμα παραγωγής της αγοράς

Εταιρεία	Παραγωγή (MWh)	Κατανάλωση (MWh)	Έσοδα (€)	Δαπάνες (€)
A	250		4000	
B	100		1600	
Γ	100		1600	
Z		200		3200
Δ		100		1600
E		150		2400
Σύνολο	450	450	7200	7200

Κεντρικές Αγορές της «επόμενης ημέρας»

Η αντιμετώπιση κάθε ωριαίας συναλλαγής ξεχωριστά δεν είναι πρακτική για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους:

- Η διαδικασία συγχρονισμού μίας μεγάλης θερμικής μονάδας παραγωγής στο σύστημα διαρκεί αρκετές ώρες
- Όταν συγχρονιστεί, μία τέτοια μονάδα, συχνά θα πρέπει να συνεχίζει να παράγει ισχύ για έναν συγκεκριμένο αριθμό ωρών

- 
- Όταν τερματίσει τη λειτουργία της, συνήθως θα πρέπει να μείνει αδρανής για έναν συγκεκριμένο αριθμό ωρών προτού μπορέσει να επανεκκινήσει
 - Η ισχύς εξόδου των μεγάλων μονάδων παραγωγής συνήθως δεν μπορεί να μειώνεται στο μηδέν. Θα πρέπει να παραμένει πάνω από την «ελάχιστη ισχύ λειτουργίας»
 - Ο ρυθμός με τον οποίο η έξοδος μίας μονάδας μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται είναι επίσης περιορισμένος

Μοντελοποίηση αγοράς σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης

Κάθε ηλεκτροπαραγωγός που συμμετέχει σε μία κεντρική αγορά της επόμενης ημέρας, **αντί** να υποβάλλει απλές προσφορές τιμής και ποσότητας, **πρέπει** να παρέχει μία σύνθετη προσφορά.

Αυτή η προσφορά αποτελείται από καμπύλη οριακού κόστους, ένα κόστος εκκίνησης και τις παραμέτρους των περιορισμών που διέπουν τη λειτουργία του

Σημείωση: Αυτά τα κόστη δεν χρειάζεται να είναι πραγματικές τιμές

Μοντελοποίηση αγοράς σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης

Ο διαχειριστής του συστήματος συνδυάζει αυτές τις συνθήκες προσφοράς με την πρόβλεψη του φορτίου της επόμενης ημέρας, για να καθορίσει ένα πρόγραμμα που θα προσδιορίζει τη στιγμή που κάθε ηλεκτροπαραγωγός πρέπει να ξεκινά και να τερματίζει τη λειτουργία της μονάδας του καθώς και την ποσότητα της ισχύος που πρέπει να παράγει κατά την διάρκεια κάθε περιόδου.

Ουσιαστικά, διενεργεί έναν παρόμοιο υπολογισμού ένταξης μονάδων με αυτόν που χρησιμοποιεί μια καθετοποιημένη επιχείρηση ηλεκτρισμού, ο οποίο βασίζεται σε προσφορές πώλησης και όχι σε πραγματικά κόστη Μαθηματικά, **αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:**



Μαθηματικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης

Συνάρτηση στόχου: Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας του συστήματος την επόμενη ημέρα

$$\min_{x_i(t), u_i(t)} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [C_i(P_i(t)) + SC_i(u_i(t), u_i(t-1))]$$

Όπου:

$P_i(t)$ είναι η παραγόμενη ισχύς της μονάδας i κατά τη διάρκεια της περιόδου t
 $u_i(t)$ είναι η κατάσταση της μονάδας i κατά τη διάρκεια της περιόδου t ($u_i(t) = 1$, όταν η μονάδα βρίσκεται των μονάδων παραγωγής που έχουν υποβάλει προσφορές.

N είναι ο αριθμός των μονάδων παραγωγής που έχουν υποβάλει προσφορές
 T είναι ο αριθμός των περιόδων συναλλαγής στον οποίο έχει χωριστεί η ημέρα

$C_i(P_i(t))$ είναι το κόστος παραγωγής μίας σταθερής $P_i(t)$ με τη μονάδα l κατά τη διάρκεια της περιόδου t

$SC_i(u_i(t), u_i(t-1))$ είναι το κόστος εκκίνησης της μονάδας i κατά τη χρονική περίοδο t και είναι μη μηδενικό μόνο εάν η μονάδα είναι ανενεργή κατά τη περίοδο $t-1$ και ενεργή κατά την t , αντίστοιχα.

Περιορισμός ισορροπίας ισχύος: Η ισχύς που παράγεται από όλες τις γεννήτριες πρέπει να ισούται με το φορτίο

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) = L(t), \quad \forall t = 1, \dots, T$$

Όπου $L(t)$ το προβλεπόμενο φορτίο κατά τη χρονική περίοδο t

Όρια λειτουργίας μονάδων:

$$P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max}, \quad \forall t = 1, \dots, T \ \& \ \forall i = 1, \dots, N$$

Όπου:

P_i^{\min} είναι το κατώτερο όριο λειτουργίας της μονάδας i

P_i^{\max} είναι το ανώτατο όριο λειτουργίας της μονάδας i



Περιορισμοί στην ταχύτητα απόκριση:

$$\begin{aligned} P_i(t) - P_i(t-1) &\leq \Delta P_i^{up}, & \forall t = 1, \dots, T \ \&\forall i = 1, \dots, N \\ P_i(t-1) - P_i(t) &\leq \Delta P_i^{down}, & \forall t = 1, \dots, T \ \&\forall i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

Όπου

ΔP_i^{up} είναι η μέγιστη αύξηση ισχύος της μονάδας i μεταξύ δύο διαδοχικών περιόδων συναλλαγής

ΔP_i^{down} είναι η μέγιστη μείωση ισχύος της μονάδας i μεταξύ δύο διαδοχικών περιόδων συναλλαγής

Περιορισμοί ελάχιστου χρόνου λειτουργίας: Μια μονάδα παραγωγής δεν επιτρέπεται να αποσυνδεθεί από το δίκτυο, παρά μόνο εάν έχει παρέλθει από τη στιγμή της ένταξής της ο ελάχιστος χρόνος υποχρεωτικής λειτουργίας T_{up}^{min}

$$\begin{aligned} &\varepsilon\Phi\nu \{u_i(t-1) = 1 \&\exists \tau > t - T_{down}^{min} \text{ τΧτοιο ώστε } u_i(\tau) = 1\} \\ &\Rightarrow u_i(t) = 1 \\ &\forall t = 1, \dots, T \&\forall i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

Περιορισμοί ελάχιστου χρόνου κράτησης: Μια μονάδα παραγωγής δεν επιτρέπεται να επανασυνδεθεί στο δίκτυο, παρά μόνο εάν έχει περάσει τουλάχιστον ο ελάχιστος χρόνος κράτησης T_{down}^{min}

$$\begin{aligned} &\varepsilon\Phi\nu \{u_i(t-1) = 0 \&\exists \tau > t - T_{down}^{min} \text{ τΧτοιο ώστε } u_i(\tau) = 1\} \\ &\Rightarrow u_i(t) = 0 \\ &\forall t = 1, \dots, T \&\forall i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

Σημ.: Όπου υπάρχει ο συμβολισμός εφν είναι το εάν

Τιμή εκκαθάρισης της αγοράς

Από την συγκεκριμένη μέθοδο βελτιστοποίησης είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς για κάθε περίοδο συναλλαγής.

Σε μία ανταγωνιστική αγορά η τιμή πρέπει να αντικατοπτρίζει το κόστος παραγωγής μίας επιπλέον μεγαβατώρας, θα έπρεπε να οριστεί στο οριακό κόστος της πιο ακριβής μονάδας παραγωγής που έχει προγραμματιστεί να παράγει ισχύ για κάθε περίοδο συναλλαγής.

Οι Πολλαπλασιαστές Lagrange του προβλήματος συνεχών μεταβλητών αποτελούν τις οριακές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτουν για κάθε μία περίοδο και δηλώνονται με το σύμβολο π_i^*

Παράδειγμα

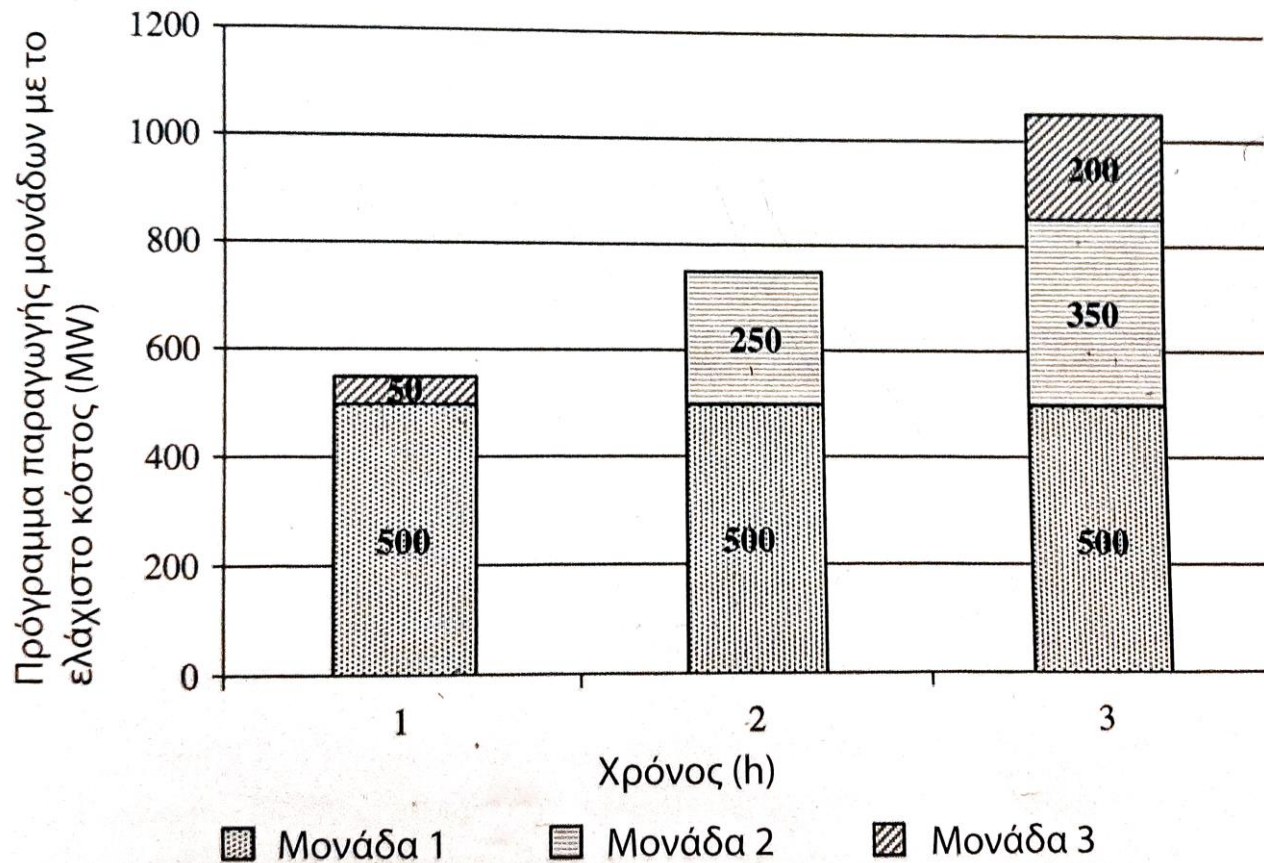
Δεδομένα των μονάδων παραγωγής

Μονάδα παραγωγής i	P_i^{\min} (MW) ελάχιστη παραγωγή	P_i^{\max} (MW) μέγιστη παραγωγή	B_i (€/MWh) οριακό κόστος	A_i (€/h) σταθερό κόστος
1	0	500	10	500
2	100	350	30	250
3	0	200	35	100

Δεδομένα ζήτησης

Χρονική περίοδος t	1	2	3
$L(t)$ (mw)	550	750	1050

Πρόγραμμα παραγωγής μονάδων με το ελάχιστο κόστος



1^η Περίοδος: Η ζήτηση των 500MW μπορεί να ικανοποιηθούν με τους εξής συνδυασμούς:

- $P_1=450\text{MW}$, $P_2=100\text{MW}$

Συνολικό κόστος:

$$500+10 \times 450 + 250 +30 \times 100 = 8250\text{€}$$

- $P_1=500\text{MW}$, $P_3=50\text{MW}$

Συνολικό κόστος:

$$500+10 \times 500 + 100 +35 \times 50= 7350\text{€}$$

- $P_2=350\text{MW}$, $P_3=200\text{MW}$

Συνολικό κόστος:

$$250+30 \times 350 + 100 +35 \times 200 = 17850\text{€}$$

2^η Περίοδος: Προκειμένου να τροφοδοτηθεί το μεγαλύτερο φορτίο, η μονάδα 1 θα πρέπει να βρίσκεται συνεχώς σε λειτουργία κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Η κατανομή της ισχύος για αυτήν την περίοδο είναι:

$$P_1=500\text{MW}, P_2=250\text{MW}$$

Συνολικό κόστος:

$$500+10 \times 500 + 250 +30 \times 250 = 13250\text{€}$$

Εφόσον η μονάδα 2 είναι η οριακή μονάδα, η τιμή για την περίοδο 2 ρυθμίζεται στο οριακό κόστος των $\pi_2^*=30\text{€/MWh}$

3^η Περίοδος: Η χρήση και των τριών μονάδων είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση του φορτίου και έτσι η βέλτιστη κατανομή ισχύος θα είναι:

$$P_1=500\text{MW}, P_2=250\text{MW}, P_3=200\text{MW}$$

Συνολικό κόστος:

$$500+10 \times 500 + 250 + 30 \times 350 + 100+35 \times 200=23350\text{€}$$

Οι μονάδες 1 και 2 αποδίδουν τη μέγιστη ισχύ τους, η μονάδα 3 είναι η οριακή μονάδα, άρα η τιμή για αυτήν την περίοδο είναι $\pi_3^*=35\text{€/MWh}$