

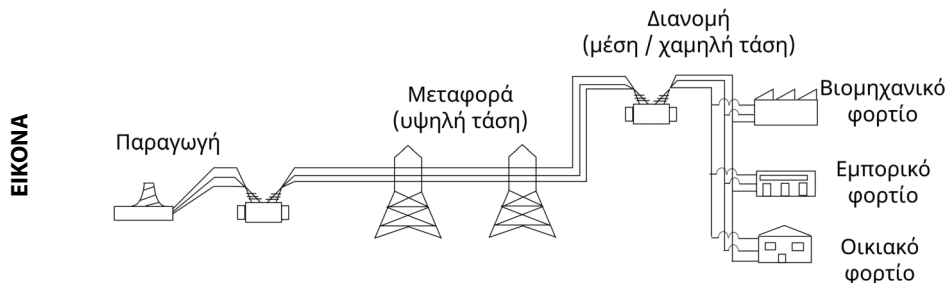
3

Λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και αγορών ηλεκτρικής ενέργειας

Η ανάπτυξη μοντέλων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας προϋποθέτει μια κατανόηση των αρχών μηχανικής που διέπουν τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και της θεσμικής οργάνωσης των αγορών ηλεκτρισμού. Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία οδηγούν σε μια ισχυρή σύνδεση μεταξύ της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρισμού και της αγοράς ηλεκτρισμού, σε αντίθεση με πολλές άλλες αγορές αγαθών, όπου η φυσική πράξη της ανταλλαγής αγαθών μπορεί να έχει μια χαλαρή σχέση με τις χρηματοοικονομικές συναλλαγές που διέπουν την αγοραπωλησία αυτών των αγαθών. Μοναδικά χαρακτηριστικά των αγορών ηλεκτρισμού που καθιστούν αναγκαίο το στενό συντονισμό μεταξύ φυσικής λειτουργίας και συναλλαγών στην αγορά συμπεριλαμβάνουν το γεγονός ότι οι καταναλωτές σε μεγάλο βαθμό δεν ανταποκρίνονται στην τιμή του ηλεκτρισμού, το γεγονός ότι η δυνατότητα αποθήκευσης είναι περιορισμένη, το γεγονός ότι η παραγωγή και η κατανάλωση πρέπει να εξισορροπούνται σε στιγμιαία βάση, και το γεγονός ότι ο φυσικός αποκλεισμός των καταναλωτών από την πρόσβαση στην κατανάλωση είναι σε μεγάλο βαθμό ανέφικτος. Οι παράγοντες αυτοί περιπλέκουν το σχεδιασμό των αγορών ηλεκτρισμού με τρόπους που διασαφηνίζονται στη συνέχεια. Η ενότητα 3.1 παρέχει μια επισκόπηση της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η ενότητα 3.2 παρέχει μια επισκόπηση των αγορών ηλεκτρισμού.

3.1 Λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι σύνθετες εφοδιαστικές αλυσίδες που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η τυπική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 10. Η δομή αυτή αποτελείται από



ΣΧΗΜΑ 10 Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τους τομείς παραγωγής, μεταφοράς, διανομής, και κατανάλωσης.

την παραγωγή, το σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης, το σύστημα μεταφοράς μέσης και χαμηλής τάσης, και την κατανάλωση. Οι καταναλωτές κατά κανόνα εντάσσονται σε τρεις κατηγορίες: βιομηχανικοί, εμπορικοί και οικιακοί. Οι ακόλουθες παράγραφοι παρέχουν μια σύνοψη των βασικών χαρακτηριστικών κάθε μέρους της εφοδιαστικής αλυσίδας, συμπεριλαμβανομένων τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών.

3.1.1 Παραγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με διάφορους τρόπους. Ο πιο συνήθης τρόπος παραγωγής από μη ανανεώσιμες πηγές είναι (i) η καύση ορυκτών καυσίμων (όπως άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) και η μετατροπή της θερμότητας που παράγεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτρομηχανικής γεννήτριας, και (ii) η σχάση ουρανίου και μετατροπή της θερμότητας που παράγεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ατμοστρόβιλων. Οι πιο συνήθεις μορφές παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμπεριλαμβάνουν (iii) τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού από ποταμούς και φράγματα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω υδροστρόβιλων, (iv) τη μετατροπή της γεωθεμίας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ατμοστρόβιλων, (v) τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρομηχανικών τουρμπινών, (vi) τη μετατροπή της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλιακών συλλεκτών, (vii) τη μετατροπή της χημικής ενέργειας της βιομάζας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω τουρμπινών καύσης, και (viii) ορισμένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (όπως κυματική και παλιρροιακή) με οριακή συνεισφορά στα υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ενέργεια μετριέται με μια ποικιλία από μονάδες μέτρησης, συμπεριλαμβανομένων των Joules, θερμίδων, βαττωρών, και της Βρετανικής θερμικής μονάδας (British thermal unit, Btu). Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει ορισμένες μετατροπές ανάμεσα σε μονάδες που απαντώνται συχνά στην πράξη. Η πιο διαδεδομένη μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεγαβαττώρα, που συμβολίζεται ως MWh, και τα εκατομμύρια Btu (million Btu), που συμβολίζονται ως MMBtu.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 Συνήθεις μετατροπές μονάδων μέτρησης ενέργειας

1 megajoule	238.8 kilocalories 947.8 Btu 0.278 kilowatt hours
1 kilocalorie	3.968 Btu
1 kilowatt hour (kWh)	359.8 kilocalories 3411 Btu
1 megawatt hour (MWh)	3.411 εκατομμύρια Btu 3.411 χιλιάδες κυβικά πόδια (mcf) φυσικό αέριο 0.097 χιλιάδες κυβικά μέτρα φυσικό αέριο
1 million Btu (MMBtu)	1055 megajoules 2520 megacalories 293.1 kilowatt hours 1000 κυβικά πόδια φυσικό αέριο
1 κυβικό μέτρο φυσικό αέριο	35.315 κυβικά πόδια φυσικό αέριο

Ο ρυθμός αλλαγής της ενέργειας μετριέται από την ισχύ. Η ισχύς μπορεί να μετρά το ρυθμό παραγωγής ενέργειας, κατανάλωσης ενέργειας, ή ροής ενέργειας. Η πιο κοινή μονάδα μέτρησης της ισχύος είναι το megawatt, το οποίο γράφεται MW. Μία megawatt ώρα αντιστοιχεί στην ποσότητα ενέργειας η οποία συγκεντρώνεται από τη ροή ενός megawatt για μία ώρα. Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί πως η παραγωγή των γεννητριών σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μετριέται σε MW, όχι MWh.

Οι μονάδες παραγωγής χρειάζεται να υπακούουν ένα εύρος λειτουργικών περιορισμών οι οποίοι αναπτύσσονται λεπτομερώς στο βιβλίο. Οι περιορισμοί δυναμικότητας περιορίζουν το μέγιστο ρυθμό με τον οποίο μια γεννήτρια μπορεί να παράγει ενέργεια. Οι θερμικές μονάδες ικανοποιούν περιορισμούς τεχνικού ελαχίστου, περιορισμούς ράμπας, και ελάχιστους χρόνους εντός και εκτός λειτουργίας. Οι υδροηλεκτρικές γεννήτριες υπόκεινται σε περιορισμούς δυναμικότητας οι οποίοι περιορίζουν την ισχύ που μπορούν να παράγουν. Τα υδροηλεκτρικά φράγματα υπόκεινται σε περιορισμούς αποθήκευσης οι οποίοι περιορίζουν τη συνολική ποσότητα νερού (και άρα ενέργειας) που μπορούν να αποθηκεύσουν. Πλήθος περιορισμών σχετίζεται με τα επίπεδα νερού στα υδροηλεκτρικά φράγματα. Η ροή νερού σε ένα δίκτυο ποταμών επίσης δημιουργεί αλληλεξαρτήσεις στη λειτουργία υδροηλεκτρικών φραγμάτων τα οποία λειτουργούν σε ακολουθία.

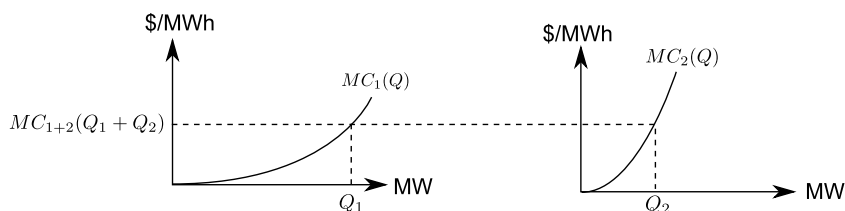
Τα κόστη παραγωγής αναπτύσσονται λεπτομερέστερα σε επόμενο κεφάλαιο. Στο στάδιο αυτό εστιάζουμε στη διαφορά μεταξύ μεταβλητού κόστους / λειτουργικού κόστους / κόστους καυσίμου (όλα συνώνυμα), οριακού κόστους, μέσου κόστους, και πάγιου κόστους / κόστους επένδυσης (επίσης συνώνυμα).

Το **μεταβλητό κόστος / κόστος λειτουργίας / κόστος καυσίμου** είναι το κόστος που εξαρτάται από την ποσότητα ισχύος που παράγει μια μονάδα. Το κόστος καυσίμου μετριέται σε €/ώρα και εκφράζει το ωριαίο κόστος που απαιτείται για να παραχθεί μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας.

Το **οριακό κόστος** είναι η παράγωγος του μεταβλητού κόστους ως προς την ποσότητα ισχύος που παράγεται, και μετριέται σε €/MWh. Αν το κόστος καυσίμου δεν είναι παραγωγίσιμο αλλά είναι συνεχής συνάρτηση, μπορεί κανείς να ορίσει το κάτω και το άνω οριακό κόστος, καθώς και το εύρος οριακού κόστους. Το **εξ αριστερών οριακό κόστος** είναι η οικονομία που επιτυγχάνεται από το να παραχθεί μία λιγότερη μονάδα ισχύος (ισοδύναμα, είναι η εξ αριστερών παράγωγος του κόστους καυσίμου). Το εκ δεξιών οριακό κόστος είναι το επιπλέον κόστος που απαιτείται για να παραχθεί μία επιπλέον μονάδα ισχύος (ισοδύναμα, η εκ δεξιών παράγωγος του κόστους καυσίμου). Όταν μια μονάδα παραγωγής παράγει στην ονομαστική της χωρητικότητα, το εκ δεξιών οριακό κόστος είναι ίσο με το άπειρο. Το **εύρος οριακού κόστους** είναι το σύνολο τιμών μεταξύ και συμπεριλαμβανομένου του εξ αριστερών και εκ δεξιών οριακού κόστους.

Όταν εξετάζεται ένα σύνολο γεννητριών, το **αθροιστικό μεταβλητό κόστος** ορίζεται ως ο φθηνότερος τρόπος με τον οποίο μπορεί να παραχθεί μια ορισμένη ποσότητα ισχύος από ένα σύνολο γεννητριών. Οι παραπάνω ορισμοί παρουσιάζονται στο παράδειγμα 3.1, και ορίζονται μαθηματικά στην ενότητα 4.2. Η **αθροιστική συνάρτηση οριακού κόστους** είναι η παράγωγος του αθροιστικού κόστους, και εξάγεται από την οργάνωση των γεννητριών σε σειρά αυξανόμενου οριακού κόστους μιας και αυτός είναι ο πιο αποδοτικός τρόπος για να παραχθεί μια ορισμένη ποσότητα ισχύος από το σύνολο των μονάδων παραγωγής.

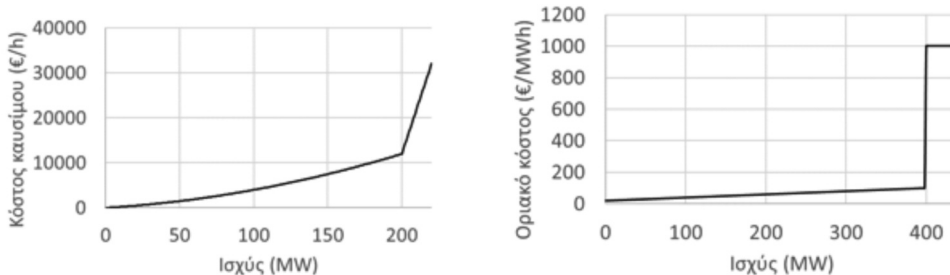
Η καμπύλη οριακού κόστους ολόκληρου του συστήματος εξάγεται από την οριζόντια πρόσθεση των καμπυλών οριακού κόστους όλων των γεννητριών του συστήματος. Αυτό παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 11. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται **καμπύλη σειράς κατά αξία** (merit order curve), γιατί καθορίζει τη σειρά των μονάδων βάσει της αξίας τους για το σύστημα, δηλαδή τη σειρά με την οποία πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι γεννήτριες για να καλύψουν τη ζήτηση σε ελάχιστο κόστος.



ΣΧΗΜΑ 11 Η άθροιση συναρτήσεων οριακού κόστους μεμονωμένων γεννητριών: το $MC_i(Q)$, $i = 1, 2$ είναι η συνάρτηση οριακού κόστους των γεννητριών 1 και 2, το $MC_{1+2}(Q)$ είναι η αθροιστική συνάρτηση οριακού κόστους.

Παράδειγμα 3.1: Οριακό κόστος μιας μονάδας με δύο περιοχές λειτουργίας. Έστω μια γεννήτρια φυσικού αερίου, η οποία έχει κόστος καυσίμου που είναι τετραγωνική συνάρτηση σε ένα φυσιολογικό εύρος λειτουργίας 0–200 MW. Το οριακό κόστος της μονάδας είναι 20 €/MWh στα 0 MW και 100 €/MWh στα 200 MW. Το οριακό κόστος είναι σταθερό και ίσο με 1000 €/MWh πέρα από τα 200 MW λόγω φόρτισης της γεννήτριας. Η μονάδα δεν μπορεί να παράγει περισσότερο από 220 MW. Το κόστος καυσίμου είναι 0 €/h όταν η γεννήτρια δεν παράγει ισχύ. Το οριακό κόστος της γεννήτριας παρουσιάζεται στο Σχήμα 12. Το εύρος οριακού κόστους στα 200 MW είναι [100, 1000] €/MWh. Το εύρος οριακού κόστους στα 220 MW είναι [1000, +∞] €/MWh.

ΕΙΚΟΝΑ



ΣΧΗΜΑ 12 Αριστερό γράφημα: μεταβλητό κόστος στο παράδειγμα 3.1. Δεξί γράφημα: το οριακό κόστος δύο πανομοιότυπων γεννητριών, των οποίων το οριακό κόστος δίνεται στο αριστερό γράφημα. Η αθροιστική καμπύλη οριακού κόστους δίνεται ως το οριζόντιο άθροισμα των καμπυλών οριακού κόστους της κάθε γεννήτριας.

Παράδειγμα 3.2: Συγχώνευση πολλαπλών μονάδων. Έστω δύο πανομοιότυπες μονάδες παραγωγής των οποίων η καμπύλη οριακού κόστους περιγράφεται στο παράδειγμα 3.1. Η αθροιστική καμπύλη οριακού κόστους και των δύο μονάδων παρουσιάζεται στο Σχήμα 12. ■

Το **πάγιο κόστος / κόστος επένδυσης** είναι το κόστος που υφίσταται μια επιχείρηση για να κατασκευάσει τις υποδομές που απαιτούνται για να παράγει, ανεξαρτήτως της ποσότητας που παράγει. Το κόστος επένδυσης διαφορετικών τεχνολογιών δηλώνεται συχνά ως ένα εφάπαξ κόστος σε €/kW ή κάποια άλλη μονάδα μέτρησης κόστους ανά μονάδα χωρητικότητας. Το **εφάπαξ κόστος** είναι το κόστος που χρειάζεται να πληρωθεί μπροστά για να κατασκευαστεί μια μονάδα. Για παράδειγμα, το εφάπαξ κόστος μιας μονάδας άνθρακα μπορεί να είναι 1000 €/kW, που συνεπάγεται ότι μια μονάδα δυναμικότητας 200 MW χρειάζεται 200 εκατομμύρια € για να κατασκευαστεί.

Είναι χρήσιμο να μετατραπεί το εφάπαξ κόστος σε μια συνεχή ροή κεφαλαίου η οποία είναι απαραίτητη για να αποπληρωθεί η επένδυση. Η μετατροπή αυτή πρέπει να

λάβει υπόψη τη χρονική αξία κεφαλαίου μέσω του επιτοκίου. Για μια τεχνολογία με διάρκεια ζωής T έτη, ένα εφάπαξ κόστος OC και δεδομένου ενός επιτοκίου r , το **αποσβεσμένο πάγιο κόστος επένδυσης**⁷, με ετήσιο ανατοκισμό, δίνεται ως

$$FC = \frac{r \cdot OC}{1 - 1/(1+r)^T}. \quad (3.1)$$

Με συνεχή ανατοκισμό, το αποσβεσμένο πάγιο κόστος είναι

$$FC = \frac{r \cdot OC}{1 - e^{-rT}}. \quad (3.2)$$

Το FC αντιπροσωπεύει μια ροή κεφαλαίου, και μετριέται σε €/kW-έτος όταν το εφάπαξ κόστος εκφράζεται σε €/kW. Αυτό είναι ένα συνολικό ποσό που πρέπει να πληρώσει ο επενδυτής ετησίως για να έχει διαθέσιμο 1 kW ορισμένης τεχνολογίας. Μπορούμε να το μετατρέψουμε σε ωριαία ροή κεφαλαίου για να έχουμε 1 MW της τεχνολογίας διαθέσιμο αν διαιρέσουμε με 8.76. Αυτό δίνει το FC εκφρασμένο σε €/MWh, τη μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται κατά κανόνα και για το οριακό κόστος.

Όταν μια επιχείρηση χρηματοδοτείται από πολλαπλές πηγές, το r αντικαθίσταται από το **σταθμισμένο μέσο κόστος κεφαλαίου** (weighted average cost of capital, WACC). Στο WACC, το επιτόκιο κάθε πηγής κεφαλαίου σταθμίζεται από το μερίδιο συνεισφοράς αυτής της πηγής κεφαλαίου στη συνολική χρηματοδότηση της επιχείρησης.

Παράδειγμα 3.3: *Μετατροπή εφάπαξ κόστους σε αποσβεσμένο πάγιο κόστος.* Έστω μια τουρμπίνα φυσικού αερίου με ένα εφάπαξ κόστος 400 €/kW και διάρκεια ζωής 25 έτη, και μια μονάδα άνθρακα με εφάπαξ κόστος 1200 €/kW και διάρκεια ζωής 45 έτη. Η εξίσωση συνεχούς ανατοκισμού (3.2) με επιτόκιο $r = 12\%$ μετατρέπει το εφάπαξ κόστος σε μια ετήσια πληρωμή ανά kW χωρητικότητας (€/kW-έτος). Διαιρώντας με 8.76, υπολογίζουμε το κόστος ανά ώρα ανά MW χωρητικότητας (€/MWh). Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα.

7. Ο ακριβής ορισμός του παγίου κόστους στα οικονομικά είναι το κόστος που σχετίζεται με συντελεστές παραγωγής οι οποίοι δεν επηρεάζονται από την επιχείρηση στη χρονική κλίμακα του οικονομικού μοντέλου που εξετάζεται. Η αναφορά μας στο κόστος επένδυσης ως πάγιο κόστος στο παρόν κεφάλαιο υποδεικνύει πως βρισκόμαστε σε χρονική κλίμακα όπου η επένδυση έχει αποφασιστεί, αλλά η παραγωγή δεν έχει αποφασιστεί, δηλαδή βρισκόμαστε σε βραχυπρόθεσμη λειτουργία (για παράδειγμα αγορές επόμενης ημέρας, ενδοημερήσιες αγορές, ή αγορές πραγματικού χρόνου). Στα μακροπρόθεσμα μοντέλα του κεφαλαίου 10, δεν υπάρχουν πάγια κόστη, γιατί ακόμη και η επένδυση σε νέα δυναμικότητα είναι μεταβλητή απόφασης της επιχείρησης. Στο μοντέλο οικονομικής κατανομής του κεφαλαίου 4, το κόστος ελαχίστου φορτίου μπορεί να θεωρηθεί ως πάγιο κόστος, γιατί έχει ήδη αποφασιστεί για μια μονάδα η οποία έχει τεθεί σε λειτουργία, και το μόνο που απομένει να αποφασιστεί από την επιχείρηση σε τόσο βραχυπρόθεσμη κλίμακα είναι πόση ηλεκτρική ισχύ να παράγει.