

Εξελιγμένα δίκτυα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας
(6^η ενότητα – Β΄ μέρος)

Οικονομία Μικροδικτύου

Παναγής Βοβός - Επίκ. Καθηγητής

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών

Πανεπιστήμιο Πατρών

- Η κατασκευή νέων κεντρικών σταθμών και δικτύων, αλλά και η επέκταση των υπαρχόντων δεν είναι οικονομικά βιώσιμη.
 - Οι αναδιαρθρωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας παρέχουν ασταθείς τιμές ηλεκτρισμού και αναξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.
 - Η ΔΠ με συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μικροδίκτυο μπορεί :
 - i) να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος (μειωμένες απώλειες μεταφοράς, αξιοποίηση θερμικών απωλειών κλπ),
 - li) να παρέχει αξιόπιστη ενέργεια στους καταναλωτές που έχουν κρίσιμα και ευαίσθητα φορτία (ηλεκτρικά και θερμικά).
 - Το σύστημα SCADA δίνει δυνατότητες χειρισμού στα μικροδίκτυα αντίστοιχες των μεγάλων ΣΗΕ.
- Επομένως, πλέον τα μικροδίκτυα μπορούν να συμμετέχουν στην απελευθερωμένη αγορά.
- Χρειάζεται πρώτα όμως να αξιολογηθούν/διευθετηθούν ρυθμιστικά και οικονομικά ζητήματα της αγοράς, για να γίνει αποτελεσματική η συμμετοχή τους στην ανοικτή αγορά.
- Πρέπει να συμμετέχουν και στην αγορά βοηθητικών υπηρεσιών προς το κυρίως δίκτυο, ώστε να έχουν μία επιπλέον πηγή εσόδων.

1) Βέλτιστη τεχνολογική επένδυση.

- Η συσσωρευμένη γνώση και τα υπάρχοντα λογισμικά από τη λειτουργία των συμβατικών ΣΗΕ πρέπει να αξιοποιηθούν/επεκταθούν στο μικροδίκτυο.

2) Αξιοποίηση των μοναδικών χαρακτηριστικών.

- Το μικροδίκτυο μπορεί να παρέχει διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας στον τελικό χρήστη, ανάλογα με τις ανάγκες του.
- Κατά την οικονομική λειτουργία του μικροδίκτυου δεν υπάρχουν οι ελάχιστοι χρόνοι κράτησης και λειτουργίας των μεγάλων μονάδων, ούτε κόστη συμφόρισης.

3) Σχέση του μικροδίκτυου με το σύστημα διανομής που συνδέεται.

- Το μικροδίκτυο χρειάζεται σε πραγματικό χρόνο την τιμή της ενέργειας, για να ελαχιστοποιεί το κόστος ενέργειας των καταναλωτών.

Η συμμετοχή του μικροδίκτυου στην αγορά των βοηθητικών υπηρεσιών του κυρίως δικτύου, περιορίζεται στην υποστήριξη της τάσης και στον περιορισμό των απωλειών (ρύθμιση άεργης ισχύος).

- Όμως το μικροδίκτυο μπορεί να παρέχει εξαιρετικές τοπικές βοηθητικές υπηρεσίες στον τελικό χρήστη, που βελτιώνουν δραστικά τα οικονομικά του (αξιοπιστία, ποιότητα κλπ).

- Αυτά τα «διαφυγόντα» κόστη των παραδοσιακών ΣΗΕ, πρέπει να συμπεριληφθούν στην οικονομική αξιολόγηση του μικροδίκτυου.
- Επιπλέον όφελος των καταναλωτών προέρχεται από την αυτόνομη λειτουργία του μικροδίκτυου: έχει σημαντικό κόστος η επίτευξη αντίστοιχης αξιοπιστίας από παραδοσιακά συστήματα.
- Από την άλλη, η οικονομία του μικροδίκτυου παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με αυτή των ΣΗΕ, όπως:
 - 1) Κανόνες οικονομικής λειτουργίας.
 - 2) Αγορά και πώληση ενέργειας σε διαφορετικούς χρόνους.
 - 3) Βέλτιστος συνδυασμός των διαφορετικών τεχνολογικά πηγών, ώστε να ταιριάζουν στους διάφορους κύκλους λειτουργίας του συστήματος.
 - 4) Καταλληλότητα τεχνολογιών υψηλού κόστους εγκατάστασης, αλλά χαμηλού κόστους παραγωγής, για την τροφοδότηση φορτίων βάσης.
 - 5) Καταλληλότητα τεχνολογιών χαμηλού κόστους εγκατάστασης, αλλά υψηλού κόστους παραγωγής, για την τροφοδότηση φορτίων αιχμής.

Από την άλλη μεριά, η οικονομία του μικροδίκτυου παρουσιάζει κάποιες σημαντικές διαφορές συγκριτικά με την αντίστοιχη των συμβατικών ΣΗΕ:

I. Συνδυασμένη βελτιστοποίηση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (CHP).

- Ο κύριος σκοπός των μονάδων CHP στο μικροδίκτυο είναι να χρησιμοποιήσουν τις απώλειες θερμότητας και να έχουν συνδυασμένη βελτιστοποίηση ηλεκτρισμού και θερμότητας (δεν αποτελούσε ποτέ τον κύριο στόχο των παραδοσιακών ΣΗΕ).

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μπορεί να αυξηθεί από το 33% των συμβατικών πηγών ενέργειας ή το 50% των σταθμών συνδυασμένου κύκλου σε περισσότερο από 80%, με τη χρήση μονάδων CHP.

- Αυτό είναι το βασικό κίνητρο για τη συνεργασία παραγωγών και καταναλωτών στην δημιουργία μικροδίκτυων με μονάδες CHP.

II. Συνδυασμένη βελτιστοποίηση φορτίου και παραγωγής.

- Η συνδυασμένη βελτιστοποίηση φορτίου και παραγωγής στο μικροδίκτυο είναι ευκολότερη, γιατί πολλές φορές καταναλωτής και παραγωγός είναι το ίδιο πρόσωπο.
- Στα παραδοσιακά ΣΗΕ αυτό επιδιώκεται με τα κυμαινόμενα τιμολόγια.
- Στο μικροδίκτυο το πιο σημαντικό κριτήριο για αυτήν τη βελτιστοποίηση είναι το «οριακό/διαφορικό κόστος» της αυτό-παραγωγής σε κάθε χρονικό σημείο.
- «Οριακό κόστος» είναι το κόστος για την παραγωγή μίας επιπλέον μονάδας του προϊόντος.
- Το μικροδίκτυο πρέπει να γνωρίζει το οριακό κόστος της παραγωγής του και τα ισοδύναμα κόστη επιβάρυνσης από τις επενδύσεις, ώστε... να αποφασίσει αν υπάρχει κέρδος από την περικοπή του φορτίου του και πώληση της απελευθερωμένης παραγωγής στην κεντρική αγορά ενέργειας.

III. Ιδιαίτερα οικονομικά μικροδίκτυου.

- Η ευελιξία των μικροδίκτυων με τοπικά ελεγχόμενη παραγωγή, διαχείριση ζήτησης, εφεδρεία και αποθήκευση ενέργειας, μπορεί να εξυπηρετήσει αποτελεσματικά τα ευαίσθητα φορτία με μειωμένο κόστος.

Σημείωση: τα συμβατικά ΣΗΕ συνήθως παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια ίδιας ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας σε όλους τους καταναλωτές. Στα μικροδίκτυα η ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές ανάλογα με τις απαιτήσεις τους σε ποιότητα και αξιοπιστία, σε ανάλογο κόστος.

IV. Οικονομικά θέματα μεταξύ μικροδίκτυου και κεντρικού ΣΗΕ.

- Η βασική φιλοσοφία είναι το μικροδίκτυο:
 - 1) να αντιμετωπίζεται από το ΣΗΕ σαν μια ομάδα φορτίων ή παραγωγών ή και τα δύο, συνδεδεμένα στο PCC,
 - 2) να έχει τη δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας,
 - 3) να μην μπορεί να επεκταθεί πέρα από τον υποσταθμό (ΧΤ).
- Όμως, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του συνεργάζεται με πιο εξελιγμένους οικονομικούς κανόνες από τους παραδοσιακούς, γι αυτό ο προσδιορισμός της τιμής της kwh στους πελάτες γίνεται πιο περίπλοκος.
- Για παράδειγμα σε καταστάσεις συμφόρησης, η τιμή στους νέους καταναλωτές μπορεί να ενθαρρύνει την ανάπτυξη του μικροδίκτυου, την αύξηση των επενδύσεων στην παραγωγή και τον έλεγχο φορτίου. Αυτό στην πράξη είναι δύσκολο. Π.χ. σε μία πυκνοκατοικημένη περιοχή, κάθε καταναλωτής μπορεί να επιλέξει ένα γειτονικό δίκτυο διανομής, επειδή προσφέρει καλύτερη τιμή.
- Έτσι, το κόστος/κέρδος κάθε μικροδίκτυου εξαρτάται από τη μορφολογία διαθέσιμων γειτονικών συστημάτων διανομής.
- Αυτό μπορεί να αλλάξει απότομα, διαταράσσοντας την οικονομική λειτουργία του.

- Ένα σύστημα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει την αγορά και την πώληση του ηλεκτρισμού χρησιμοποιώντας την προσφορά και τη ζήτηση για να καθορίσει την τιμή.
- Οι μεμονωμένοι καταναλωτές δεν έχουν τα οικονομικά κίνητρα και την απαραίτητη εξειδίκευση και τεχνογνωσία, ώστε να συνεισφέρουν στο μηχανισμό τιμολόγησης.
- Αυτό όμως γίνεται όταν συνδέονται σε ένα μικροδίκτυο.
- Θα αναλύσουμε ένα μηχανισμό τιμολόγησης της ενέργειας του μικροδίκτυου στην ανταγωνιστική αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Το μικροδίκτυο συμμετέχει με τον CC στις προσφορές και στον διακανονισμό των **MCPs** (**M**arket **C**learing **P**rices, τιμές εκκαθάρισης αγοράς) για τις χρονικές περιόδους της επόμενης ημέρας.

Δύο σημαντικές τεχνικές διακανονισμού της αγοράς είναι:

- **Η αγορά ενέργειας επόμενης ημέρας**, στην οποία όταν κλείσει η περίοδος πλειοδοσίας για την αγορά της μίας ημέρας μπροστά, ο διαχειριστής του δικτύου υπολογίζει τις MCPs της επόμενης ημέρας.
- Βασίζεται στις προσφορές και τους υποβληθέντες προγραμματισμούς λειτουργίας, ώστε να επιτευθεί το ελάχιστο κόστος, συναρτήσει των περιορισμών για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος και τις εντάξεις των μονάδων.
- **Η αγορά πραγματικού χρόνου**, που έχει σχεδιασθεί για να παρέχει ευκαιρίες στους παραγωγούς που είναι διαθέσιμοι, αλλά δεν έχουν επιλεγεί από τον προγραμματισμό της αγοράς επόμενης ημέρας.

Αυτοί μπορούν να αλλάξουν τις προσφορές τους για χρήση στην αγορά πραγματικού χρόνου, αλλιώς οι αρχικές προσφορές τους στην αγορά μίας ημέρας μπροστά παραμένουν σε ισχύ.

- «Ταιριάζει» παραγωγή και ζήτηση που δεν έχει συμφωνηθεί την προηγούμενη ημέρα (απόκλιση από πρόβλεψη), μία ώρα πριν τον πραγματικό χρόνο.

Διαδικασία πλειοδοσίας.

- Η ολιγοπωλιακή φύση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μειώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητά της.
- Ένας καλός εμπορικός μηχανισμός αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχία της.
- Στη μορφή που έχουν οι τρέχουσες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας οι δύο πλευρές ενδιαφερομένων (παραγωγοί και καταναλωτές) δεν γνωρίζουν το τρέχον επίπεδο ζήτησης και το τρέχον διαθέσιμο επίπεδο ονομαστικής ισχύος των παραγωγών.
- Το γεγονός αυτό προκαλεί επιπλοκές και αβεβαιότητες στις προσφορές των αγοραστών και των πωλητών.
- Επιπλέον, οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να δημοπρατούν ταυτόχρονα περισσότερα από ένα προϊόντα, π.χ. ενέργεια σε πραγματικό χρόνο, λειτουργική εφεδρεία, προϊόντα βοηθητικών υπηρεσιών κλπ.

Υπάρχουν δύο μορφές πλειοδοσίας που ακολουθούνται από τους παραγωγούς:

- Προσφορές για συνολική παραγωγή (**block order**), όπου προσφέρεται σταθερή ισχύς και τιμή για έναν ορισμένο αριθμό συνεχόμενων ωρών μέσα στην ίδια ημέρα.
- Οι προσφορές εξαρτώνται κυρίως από τις εκτιμήσεις για τα κόστη παραγωγής και ένταξης/απένταξης, καθώς και προβλέψεις για τις επικείμενες μεταβολές του φορτίου.
- Πλειστηριασμός με σφραγισμένες προσφορές (**sealed bid**), όπου οι παραγωγοί υποβάλλουν εμπιστευτικά την ανταγωνιστική προσφορά τους στον διαχειριστή του πλειστηριασμού για την τροφοδοσία του φορτίου που έχει προβλεφθεί από αυτόν.

Σκοπός του κάθε παραγωγού είναι να μεγιστοποιήσει το κέρδος του. Αντίθετα, ο διαχειριστής του πλειστηριασμού χρησιμοποιεί μια στρατηγική προγραμματισμού που ελαχιστοποιεί το κόστος για τον καταναλωτή.

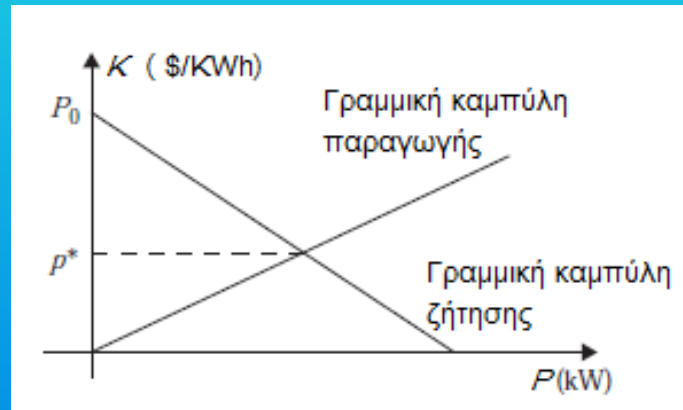
Στις αγορές χρησιμοποιούνται συνήθως δύο κανόνες καθορισμού τιμών στους πλειστηριασμούς :

- **Κανόνες ομοιόμορφης ή μοναδικής τιμής εκκαθάρισης**, όπου οι παραγωγοί-πωλητές θα λάβουν την MCP για την παροχή της ηλεκτρικής τους ενέργειας ακόμα και αν προσέφεραν χαμηλότερη τιμή και όλοι οι καταναλωτές θα πληρώσουν την MCP ακόμα και αν έχουν προσφέρει υψηλότερη τιμή (δηλαδή οι πληρωμές γίνονται με το οριακό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας).
- **Κανόνες εκκαθάρισης διακριτικής τιμής ή πληρωμής σύμφωνα με την τιμή προσφοράς**, όπου ο κάθε συμμετέχοντας που έχει πλειοδοτήσει σε μία προσφορά πληρώνει ή πληρώνεται στην τιμή της προσφοράς του.
- Εδώ το σύστημα δεν βασίζεται στο οριακό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας: οι προσφορές γίνονται εκτιμώντας την τιμή **cut-off** (τιμή αποκοπής, πάνω από την οποία απορρίπτονται οι προσφορές).

- Το μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι παράγουν κάποιες εταιρίες υψηλού κόστους και δεν παράγουν εταιρίες χαμηλού κόστους, λόγω λανθασμένης εκτίμησης της τιμής αποκοπής.
- Όμως με αυτόν τον τρόπο το κόστος παραγωγής αυξάνεται πάνω από το κόστος εκκαθάρισης της αγοράς και αυξάνει το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Έτσι, συνήθως προτιμάται ο ομοιόμορφος καθορισμός της τιμής.
- Όμως, σε περιόδους μεγάλης αύξησης του κόστους κάποιου καυσίμου που χρησιμοποιείται αρκετά για ηλεκτροπαραγωγή σε μία αγορά...

η MCP οδηγείται σε πολύ υψηλά επίπεδα λόγω των παραγωγών που το χρησιμοποιούν, οπότε το κόστος για τους καταναλωτές φτάνει σε δυσθεώρητα επίπεδα.

- Η MCP είναι η χαμηλότερη τιμή η οποία λαμβάνεται από την τομή των καμπυλών προσφοράς αθροιστικής παραγωγής και ζήτησης.
- Παρακάτω φαίνεται η τομή για γραμμικές καμπύλες προσφορών παραγωγής και ζήτησης. Οι προσφορές παραγωγής (πώλησης) ταξινομούνται από τις χαμηλότερες τιμές στις υψηλότερες, ενώ το αντίθετο γίνεται για τις προσφορές ζήτησης (αγοράς).



Γραμμικές καμπύλες προσφορών παραγωγής και ζήτησης.

- Σε αυτήν την τιμή οι παραγωγοί και οι καταναλωτές είναι ικανοποιημένοι.
- Παρέχεται αρκετή ηλεκτρική ενέργεια από τις αποδεκτές προσφορές πώλησης των παραγωγών για να ικανοποιούνται όλες οι αποδεκτές προσφορές αγοράς.

- **Εξουσία** στην αγορά είναι η δύναμη που έχουν οι συμμετέχοντες στην αγορά να τη χειραγωγούν για δικό τους όφελος.
 - Η άσκηση εξουσίας ευνοείται από τη συμφόρηση στην μεταφορά, το μέγεθος των συμμετεχόντων στην αγορά και τη δομή της αγοράς.
 - Η **συμφόρηση** είναι συνηθισμένο πρόβλημα στα ΣΗΕ και όσο διαρκεί δημιουργεί, ουσιαστικά, τοπικά μονοπώλια/ολιγοπώλια.
 - Το πρόβλημα περιορίζεται από τη λειτουργία του μικροδίκτυου και τον προγραμματισμό της παραγωγής στην αγορά ημέρας μπροστά.
 - Έτσι κι αλλιώς **μεγάλοι παραγωγοί** εύκολα χειραγωγούν τις τιμές ενέργειας που έχουν οριστεί μακριά από το οριακό της κόστος.
- Επειδή στην αγορά του μικροδίκτυου **συμμετέχουν οι ΑΠΕ** που έχουν ευμετάβλητη/απρόβλεπτη συμπεριφορά, άρα δυσκολεύουν τον προγραμματισμό παραγωγής, **η δομή και οι κανόνες της αγοράς** είναι επίσης σημαντικές αιτίες για κάποιου είδους άσκησης εξουσίας.
- Η έκταση της εξαρτάται και από το μηχανισμό εκκαθάρισης: μοναδική τιμή εκκαθάριση ή πληρωμή σύμφωνα με την τιμή προσφοράς.

- Η απόλυτη ταύτιση μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχεδόν απίθανη για ένα συμβατικό ΣΗΕ.
- Στο μικροδίκτυο αυτή η διαφορά μπορεί εύκολα να καλυφθεί από τις συσκευές αποθήκευσης, την απόκριση ζήτησης και τις ταχύτατες παραγωγές που διαθέτει.

Επίσης, η φορολόγηση των εκπομπών CO₂ που προκαλείται από την παραγωγή με τη χρήση ορυκτών καυσίμων θα ενθαρρύνει την ανάπτυξη των αποδοτικότερων και «καθαρότερων» μικροδίκτυων.

- Τα μικροδίκτυα μπορούν να εξασφαλίζουν ισορροπία ισχύος, έλεγχο τάσης και συχνότητας, αξιοπιστία στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και ποιότητα ισχύος: υπηρεσίες προς τοπικούς καταναλωτές και κεντρικό δίκτυο.
- Οικονομικές αναλύσεις υπό τα ισχύοντα οικονομικά και ρυθμιστικά πλαίσια για τη ΔΠ, αποδεικνύουν ότι τα μικροδίκτυα μπορούν να συνεισφέρουν ένα σημαντικό ποσοστό της ενεργειακής ζήτησης με αρκετά οικονομικά οφέλη.
- Τα μικροδίκτυα μπορούν να διευκολύνουν την εφαρμογή και άλλων πρόσθετων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, μειώνοντας και την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου.
- Τα ρυθμιστικά πλαίσια και η δομή των αντίστοιχων αγορών καθορίζουν την έκταση του οφέλους και την εύρυθμη λειτουργία τους.