

ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Σημειώσεις στο μάθημα:
«Διανεμημένη Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας»

Επιμέλεια:
Στημονιάρης Δημήτριος
Τσιαμήτρος Δημήτριος

Κοζάνη, Φεβρουάριος 2014

Περιεχόμενα

1. Διανεμημένη Παραγωγή: Ορισμός και Είδη	4
1.1 Ορισμός της έννοιας της διανεμημένης παραγωγής. Αναγκαιότητα σύνδεσης στο δίκτυο	4
1.2 Είδη μονάδων διανεμημένης παραγωγής και ειδικά χαρακτηριστικά τους.....	5
1.3 Δυσκολίες αύξησης της διείσδυσης μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο. Ο ρόλος του υπάρχοντος ηλεκτρικού δικτύου	11
2. Το έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο	15
2.1 Πιθανοί τρόποι υλοποίησης του έξυπνου δικτύου, ως λύσης για την αύξηση της διείσδυσης μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο ηλεκτρικό δίκτυο	15
2.2 Το μικροδίκτυο ως απαραίτητη δομική μονάδα του έξυπνου ηλεκτρικού δικτύου – ορισμός και χαρακτηριστικά, τοπολογίες	17
2.2.1. Ορισμός και χαρακτηριστικά των μικροδικτύων.....	17
2.2.2 Ελεγχόμενα φορτία	19
2.2.3 Νησιδοποίηση για βελτιωμένη αξιοπιστία	19
2.2.4 Το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου.....	23
2.2.5 Τοπολογίες ελέγχου μικροδικτύων	24
3. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας	27
3.1 Μπαταρίες.....	27
3.2 Συστήματα κυψελών καυσίμου.....	30
3.2.1. Παραγωγή του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού.....	30
3.2.2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ - ΜΕΤΑΦΟΡΑ - ΔΙΑΝΟΜΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	32
3.2.3. Βασικοί τύποι κυψελών καυσίμου	34
3.2.4. Χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου τύπου PEM και περιφερειακά συστήματα	35
4. Έλεγχος ευστάθειας μικροδικτύου – διαφορές από το συμβατικό δίκτυο	38
4.1 Ρύθμισης τάσης και συχνότητας στο συμβατικό δίκτυο, αιτίες αναποτελεσματικότητας στο έξυπνο δίκτυο και παραλλαγή για εφαρμογή στο έξυπνο δίκτυο	39
4.1.1. Περιγραφή ενός τυπικού μικροδικτύου	39
4.1.2. Μέθοδος ελέγχου πτώσης (droop control).....	40
4.1.3. Η μοντελοποίηση του Inverter	41
4.1.4. Τα μοντέλα των μονάδων ΔΠ	41
4.1.5. Μελέτες προσομοίωσης	42
4.2 Πρωτοβάθμιος, δευτεροβάθμιος και τριτοβάθμιος έλεγχος μικροδικτύου	44
4.2.1. Πρωτοβάθμιος έλεγχος: εξασφάλιση αξιοπιστίας λειτουργίας, ακόμη και όταν η επικοινωνία έχει αποτύχει.	44
4.2.2. Δευτερεύον έλεγχος: βελτιστοποίηση της ποιότητας ισχύος.....	45
4.2.3. Τριτοβάθμιος έλεγχος: οικονομική βελτιστοποίηση	45
5. Επικουρικές Υπηρεσίες Μονάδων Διανεμημένης Παραγωγής	48
5.1 Η έννοια της επικουρικής υπηρεσίας των μονάδων διανεμημένης παραγωγής	48

5.2 Αναγκαιότητα των συμβολαίων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που προσαρμόζονται στις επικουρικές υπηρεσίες των μονάδων.....	48
6. Διαδικασία αδειοδότησης μονάδων διανεμημένης παραγωγής από το ΔΕΔΔΗΕ – τεχνικά κριτήρια.....	50
6. Αναφορές	51

1. Διανεμημένη Παραγωγή: Ορισμός και Είδη

1.1 Ορισμός της έννοιας της διανεμημένης παραγωγής. Αναγκαιότητα σύνδεσης στο δίκτυο

Ο όρος διανεμημένη παραγωγή (ΔΠ) ηλεκτρικής ενέργειας (ΗΕ) ή στα Αγγλικά Distributed Generation (DG), αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πολλές, μικρές και διεσπαρμένες γεωγραφικά μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διαφορές τους από τις μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- 1) Η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς τους είναι πολύ μικρότερη από αυτή των μεγάλων μονάδων.
- 2) Η σύνδεση τους με το ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να γίνει στη μέση ή ακόμα και στη χαμηλή τάση-XT (20 kV και 400 V αντίστοιχα).
- 3) Η χωροθέτηση τους εξαρτάται συνήθως από την πρωτογενή μορφή ενέργειας που χρησιμοποιούν για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Για παράδειγμα, τα μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια χωροθετούνται συνήθως σε ορεινούς όγκους με μεγάλες υψομετρικές διαφορές ή κατά μήκος της κοίτης μεγάλων ποταμών.
- 4) Μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις και σε ορισμένες χρονικές περιόδους να σταματήσουν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια ή να μετατραπούν σε καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές του πετρελαίου, η ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη και προστασία του περιβάλλοντος κατέστησαν αναγκαία την αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι και η κυριότερη αιτία ύπαρξης της διανεμημένης παραγωγής ΗΕ. Και αυτό γιατί οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας εμφανίζουν κυρίως το τρίτο χαρακτηριστικό των μονάδων ΔΠ-ΗΕ που αναφέρθηκε παραπάνω: Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, όπως η περίπτωση των ΥΗΣ ή των αιολικών πάρκων, τα οποία είναι δυνατόν να λειτουργήσουν αποδοτικά σε περιοχές με υψηλά αιολικά δυναμικά.

1.2 Είδη μονάδων διανεμημένης παραγωγής και ειδικά χαρακτηριστικά τους

Τα σημαντικότερα είδη μονάδων διανεμημένης παραγωγής ΗΕ είναι τα ακόλουθα:

- 1) Τα φωτοβολταϊκά πάρκα μικρής ή μεγαλύτερης ισχύος.
- 2) Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ)
- 3) Τα αιολικά πάρκα
- 4) Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα-βιοαέριο.

Τα τρία πρώτα είναι αρκετά διαδεδομένα στην Ελλάδα, ενώ το τέταρτο όχι. Επίσης τα τρία πρώτα αναλύονται εκτενώς σε μαθήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Συνεπώς στην παρούσα παράγραφο, για τα τρία πρώτα θα αναλυθούν μόνο εκείνα τα χαρακτηριστικά που διευκολύνουν ή δυσχεραίνουν τη διείσδυσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για το τέταρτο θα γίνει ελαφρώς μεγαλύτερη ανάλυση, γιατί δεν συνηθίζεται η ανάλυσή του σε μαθήματα ΑΠΕ ούτε απαντάται συχνά στην Ελληνική επικράτεια.

1.2.1 Τα φωτοβολταϊκά πάρκα μικρής ή μεγαλύτερης ισχύος

Οι «φωτοβολταϊκές μονάδες ΔΠ» χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: (α) αυτές που είναι μόνο παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας και έχουν συνήθως ονομαστική ισχύ άνω των 20 kWp και (β) εκείνες που είναι παραγωγοί και καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, εντοπίζονται στις στέγες των οικιακών καταναλωτών και έχουν ονομαστική ισχύ που δεν ξεπερνά τα 10 kWp.



Σχήμα 1: Φ/Β πάρκο 100 kW (μερική άποψη) – (Κ-Ενεργειακή ΑΕ).

Μια ακόμα μεταξύ τους διαφορά είναι ότι τα πρώτα συνδέονται συνήθως στο δίκτυο μέσης τάσης (MT-20 kV στην Ελλάδα) μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης XT/MT. Τα δεύτερα συνδέονται στο δίκτυο διανομής της χαμηλής τάσης (400 V πολική ή 230 V φασική τάση).

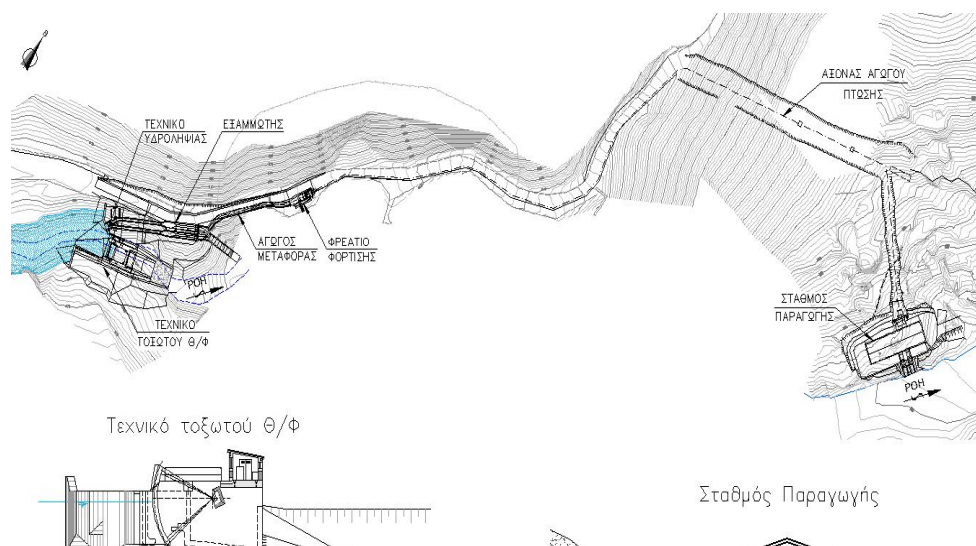
Για τη δεύτερη κατηγορία είναι προφανές ότι η τυχαιότητα στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο εξαρτάται από δύο αστάθμητους παράγοντες: τις καιρικές συνθήκες και την οικιακή κατανάλωση σε κάθε χρονική στιγμή. Για την πρώτη κατηγορία η κυριότερη αιτία διακύμανσης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς το δίκτυο είναι οι καιρικές συνθήκες.

Και στις δύο περιπτώσεις, η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι περιορισμένες, κυρίως λόγω του μεγάλου κόστους επένδυσης σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

Τέλος πρέπει να τονιστεί η έλλειψη ευελιξίας-δυνατότητας ρύθμισης της ενεργής ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών πάρκων ή της παραγωγής άεργου ισχύος, με τις σημερινές υποδομές και κανονισμούς. Αυτό συμβαίνει γιατί μέχρι σήμερα σκοπός των Φ/Β πάρκων ήταν η έγχυση της μέγιστης ενεργού ισχύος ή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για να γίνει δυνατή η ρύθμιση της ενεργής ισχύος εξόδου ή η παραγωγή άεργου ισχύος, πρέπει να γίνουν αλλαγές στους κανονισμούς και στα κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος των πάρκων.

1.2.2. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ)

Οι ΥΗΣ στην Ελλάδα χωρίζονται σε αυτούς που εντοπίζονται σε μεγάλα τεχνητά φράγματα και σε εκείνους που εντοπίζονται σε σημεία όπου μπορεί να εξασφαλιστεί μεγάλη υψομετρική διαφορά υδατόπτωσης (>70 m). Η μεγαλύτερη διαφορά τους είναι ότι τα πρώτα αποτελούν συνήθως έργα εθνικής εμβέλειας και μεγάλης ισχύος (>100 MW), ενώ τα δεύτερα είναι μικροί σταθμοί με ονομαστική ισχύ που δεν ξεπερνά τα 5 MWp και είναι συνήθως ιδιωτικών συμφερόντων. Οι μονάδες που εμφανίζουν μεγάλο ενδιαφέρον είναι οι μικρές μονάδες με ισχύ μέχρι 5 MW, καθώς έχουν συγκεκριμένη γεωγραφική διασπορά (ορεινοί όγκοι, άρα και αραιοκατοικημένες περιοχές) και παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση. Αυτοί οι ΥΗΣ συνδέονται πάντα στο δίκτυο της MT (20 kV).



Σχήμα 2: Σχέδιο από τεχνική μελέτη μικρού ΥΗΣ 2,43 MWp (ΣΟΦΙΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί ΑΕ)

Η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι και εδώ ανύπαρκτη, λόγω του μεγάλου κόστους επένδυσης σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

Τέλος, οι μικροί ΥΗΣ έχουν δυνατότητες ρύθμισης της ισχύος εξόδου ή παραγωγής άεργης ισχύος, λόγω της σύγχρονων γεννητριών τους. Παρόλα αυτά, μέχρι σήμερα σκοπός και των ΥΗΣ είναι η έγχυση της μέγιστης ισχύος ή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

1.2.3. Τα αιολικά πάρκα

Τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα κατασκευάζονται σε περιοχές όπου, το αιολικό δυναμικό είναι υψηλό, τόσο ώστε να συμφέρει τεχνοοικονομικά η εγκατάστασή τους. Το αιολικό δυναμικό για όλες τις περιοχές της Ελλάδας έχει ήδη χαρτογραφηθεί (<http://www.cres.gr/kape/datainfo/maps.htm>) και μπορεί να υποδείξει κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενός μελλοντικού αιολικού πάρκου.

Ως αποτέλεσμα, πολλά αιολικά πάρκα σήμερα έχουν κατασκευαστεί σε νησιά, που δεν είναι διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδας (π.χ. Σάμος), ενώ άλλα είναι εγκατεστημένα σε κορυφογραμμές. Κατά συνέπεια, η μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί δύσκολο και το κυριότερο κοστοβόρο εγχείρημα.

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες για αιολικά πάρκα έχουν ονομαστική ισχύ πάνω από 750 kWp. Κατά συνέπεια, τα αιολικά πάρκα έχουν ονομαστική ισχύ της τάξης των 10 kWp και άνω και συνδέονται επίσης στο δίκτυο της ΜΤ.

Η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι και εδώ ανύπαρκτη, λόγω του μεγάλου κόστους επένδυσης σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

Τέλος, τα αιολικά πάρκα έχουν δυνατότητες ρύθμισης της ισχύος εξόδου ή παραγωγής άεργης ισχύος, λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος που τις ελέγχουν. Παρόλα αυτά, μέχρι σήμερα σκοπός και των αιολικών πάρκων είναι η έγχυση της μέγιστης ισχύος ή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι τα παραπάνω είδη ΔΠ-ΗΕ δεν έχουν καμία αλληλεπίδραση μεταξύ τους και σκοπό έχει η κάθε μία την παραγωγή της μέγιστης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.

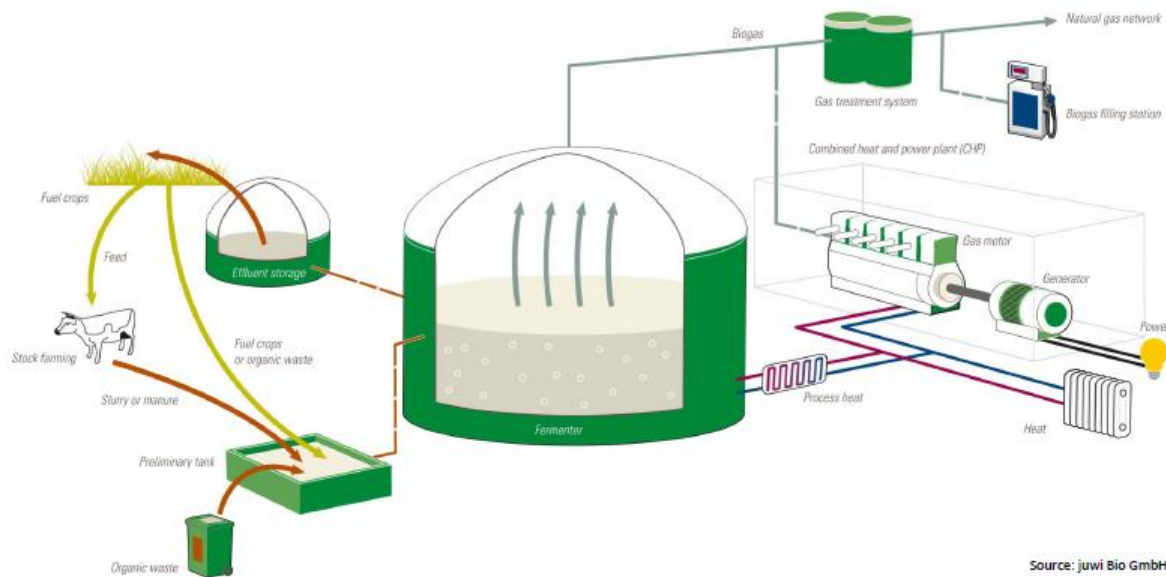
1.2.4 Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα-βιοαέριο

Όλες οι παραπάνω ΑΠΕ δεν είναι ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών, γεγονός που παρεμποδίζει την «βάσει ζήτησης» παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και απαιτεί να επενδύσει κανείς στην ικανότητα αποθήκευσής της. Μεταξύ των λίγων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών είναι αυτές που βασίζονται στη βιομάζα, εκ των οποίων το βιοαέριο κατέστη η πιο σημαντική (πηγή) στην Κεντρική Ευρώπη μέχρι σήμερα.



Σχήμα 3: Μονάδα παραγωγής βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο ισχύος 500 kW (Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin)

Energy Production in a Biogas Plant

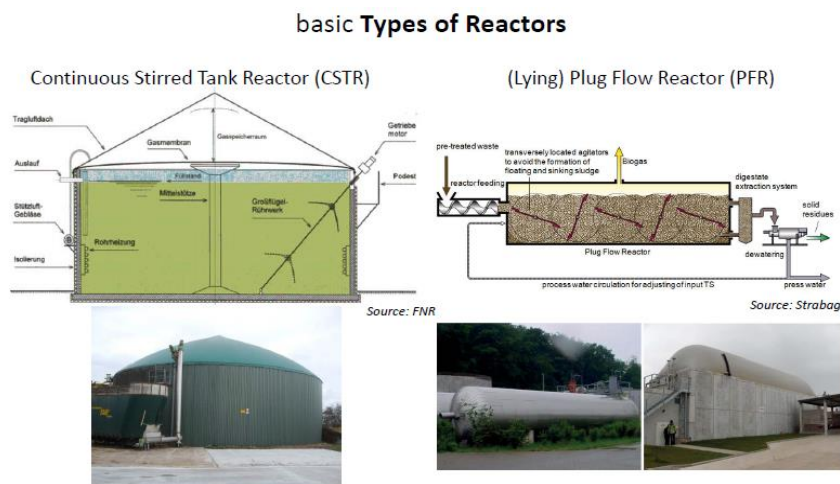


Σχήμα 4: Παραγωγή ενέργειας σε μια μονάδα βιοαερίου (Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin)

Στο σχήμα 4 φαίνεται παραστατικά η διαδικασία παραγωγής βιοαερίου και η χρήση του για την παραγωγή ενέργειας. Οργανικά οικιακά ή βιομηχανικά απόβλητα (π.χ. υπολείμματα επεξεργασίας τυριού ή οινοποιείων), μαζί με κοπριά ή λυματολάσπη βιολογικών καθαρισμών, υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών (π.χ. άχυρα) και ενεργειακά γεωργικά προϊόντα (π.χ. αγριαγκινάρα, σόργος) περνούν από ένα πρόωρο στάδιο επεξεργασίας (preliminary tank) και κατόπιν εισάγονται στην κύρια δεξαμενή (fermenter). Εκεί δημιουργείται το βιοαέριο (υγρή και αέρια φάση) και εκεί αποθηκεύεται, καθώς η οροφή είναι εύκαμπτη. Στη συνέχεια διοχετεύεται σε μηχανή εσωτερικής καύσης, που περιστρέφει μία στροβιλογεννήτρια ή χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας (μέρος της οποίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιοαερίου) ή υπόκειται σε κατάλληλη επεξεργασία (gas treatment system) και χρησιμοποιείται στην αυτοκίνηση ή τοποθετείται σε μοτιλίες. Τέλος, το υπόλειμμα της κυρίως δεξαμενής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα.



Σχήμα 5: Το εσωτερικό της κύριας δεξαμενής. Διακρίνονται η εύκαμπτη οροφή και ο αναδευτήρας, καθώς και οι σωληνώσεις που μεταφέρουν θερμότητα στο μείγμα (Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin)



Σχήμα 6: Βασικοί τύποι δεξαμενών παραγωγής βιοαερίου (Chair of Bioprocess Engineering, TU-Berlin)

Ένα από τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του βιοαερίου είναι ότι συνήθως χωροθετείται σε περιοχές πλησίον την πρώτης ύλης, δηλαδή σε αγροτικές, κτηνοτροφικές μονάδες ή σε σημεία βιολογικών καθαρισμών, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχει κοντά το δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης. Συνεπώς η σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο δεν είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα.

Επίσης, όπως είναι προφανές, οι μονάδες βιοαερίου δεν εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες. ενώ υπάρχει και δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή βιοαερίου στην κύρια δεξαμενή. Τέλος, είναι δυνατή η ευελιξία-δυνατότητα ρύθμισης της ενεργής και άεργης ισχύος εξόδου, λόγω της σύγχρονης γεννήτριας από την οποία συνοδεύεται. Παρόλα αυτά, μέχρι σήμερα σκοπός των μονάδων βιοαερίου είναι η έγχυση της μέγιστης ενεργού ισχύος ή ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο και κατά συνέπεια η παραπάνω δυνατότητα δεν αξιοποιείται.

Κάποια αρνητικά σημεία των μονάδων βιοαερίου είναι ότι εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα-τιμή της πρώτης ύλης, αφού μέσα σε ένα ημερολογιακό έτος, τα διαθέσιμα υλικά για την παραγωγή βιοαερίου ποικίλουν, άρα μπορεί να διαφοροποιείται και η τιμή στην οποία θα

παρασχεθούν στη μονάδα. Συνεπώς, η πρώτη ύλη είναι μεταβλητής ποιότητας και εξαρτάται από εποχιακές επιδράσεις.

1.3 Δυσκολίες αύξησης της διείσδυσης μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο. Ο ρόλος του υπάρχοντος ηλεκτρικού δικτύου

Είναι προφανές ότι οι τρεις πρώτοι τύποι μονάδων ΔΠ-ΗΕ (Φ/Β πάρκα, ΥΗΣ και Αιολικά πάρκα) έχουν ένα βασικό λόγο που δυσχεραίνει την αυξημένη διείσδυσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο: Δεν είναι ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών, γεγονός που παρεμποδίζει την «βάσει ζήτησης» παραγωγή ενέργειας και απαιτεί να επενδύσει κανείς στην ικανότητα αποθήκευσής της. Επίσης, δεν υπάρχει καμία συντονισμένη αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών αυτών ειδών ΔΠ, ώστε να διευκολυνθεί η βάσει ζήτησης παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ.

Από την άλλη, οι μονάδες βιομάζας και ειδικά βιοαερίου είναι ανεξάρτητες των καιρικών συνθηκών. Αυτές όμως αντιμετωπίζουν άλλου είδους δυσκολίες για την αύξηση της διείσδυσής τους στο ηλεκτρικό δίκτυο, κυρίως στη Δυτική Ευρώπη. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με χρήση παραγωγής βιοαερίου υπόκειται σε κριτική, δεδομένου ότι η ανανεώσιμη πρώτη ύλη χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας και όχι για την προμήθεια στην τροφική αλυσίδα ή για την παραγωγή χημικών, τα οποία είναι μεγαλύτερης οικονομικής αξίας. Ως εκ τούτου, συνιστά ένα μείζον ζήτημα στη Δυτική Ευρώπη, το πώς η παραγωγή ενέργειας από μονάδες παραγωγής βιοαερίου μπορεί να γίνει ευέλικτη, έτσι ώστε διαφορετικοί τύποι πρώτης ύλης να μπορούν να χρησιμοποιηθούν (κυρίως απόβλητα), και η «βάσει ζήτησης» παραγωγή ενέργειας σε συνδυασμό με την αιολική και ηλιακή ενέργεια να καθίσταται δυνατή. Η αύξηση της ευελιξίας στη λειτουργία των μονάδων παραγωγής βιοαερίου είναι επίσης σημαντική όταν εξετάζεται η εξάπλωση αυτής της τεχνολογίας σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από φτώχη διαθεσιμότητα ορισμένων «ενεργειακών καλλιεργειών». Σε μια τέτοια περίπτωση, η ενσωμάτωση της ενεργειακής αξιοποίησης βιολογικών αποβλήτων γίνεται ακόμη πιο σημαντική, προκειμένου να μην διαταραχθεί η τοπική γεωργία. Συνεπώς, η πρώτη ύλη είναι μεταβλητής ποιότητας και εξαρτάται από εποχιακές επιδράσεις.

Από την άλλη, στην Ελλάδα, τα πράγματα για τη ενέργεια από βιομάζα είναι εντελώς διαφορετικά. Σύμφωνα με όσα γνωρίζουμε, στην Ελλάδα, έχουν εγκατασταθεί μέχρι σήμερα λιγότερες από πέντε βιομηχανικές μονάδες παραγωγής βιοαερίου και δεν συνδέονται με οποιαδήποτε άλλη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ιδιαίτερα στις **βόρειες περιοχές της Ελλάδας**, μεγάλες ποσότητες βιογενών αποβλήτων από τη βιομηχανία φρούτων μένουν ανεκμετάλλευτες. Στην πλειοψηφία των **νησιών**, οι καλλιέργειες έχουν σταματήσει και ως εκ τούτου, καλλιεργήσιμες εκτάσεις δεν χρησιμοποιούνται πια. Εν τω μεταξύ, τα συλλεγόμενα βιολογικά απόβλητα (υγρά απόβλητα και απόβλητα τροφίμων από τα ξενοδοχεία κλπ.) σε νησιά που δεν είναι διασυνδεδεμένα

ηλεκτρικά με την ηπειρωτική χώρα επίσης δεν χρησιμοποιούνται με οποιοδήποτε τρόπο, ενώ η παραγωγή ενέργειας εκεί σχετίζεται με υψηλά κόστη, δεδομένου ότι βασίζεται σε ντιζελογεννήτριες. Επομένως, ειδικά ρυθμιζόμενα τιμολόγια έχουν εκδοθεί υπέρ των κατοίκων των νησιών που διαφορετικά θα έπρεπε να πληρώνουν υψηλά ποσά για την ενεργειακή τους κατανάλωση. Αυτή η διαφορά στην τιμή θα πρέπει να αντισταθμιστεί από τους άλλους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας οδηγώντας σε αύξηση του δικού τους κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Η αντικατάσταση της παραγωγή ενέργειας που βασίζεται στο πετρέλαιο από ανανεώσιμες πηγές συμπεριλαμβανομένου του βιοαερίου στα νησιά και γενικά σε περιοχές όπου τα βιογενή απόβλητα δεν χρησιμοποιούνται, θα οδηγούσε συνεπώς σε μια συνολικά πιο αποδοτική ενεργειακή πολιτική στην Ελλάδα διασφαλίζοντας την ασφάλεια του εφοδιασμού και τη σταδιακή απομάκρυνση από μια οικονομία βασισμένη στον άνθρακα και το πετρέλαιο.

Όμως, υπάρχει ένας κοινός και πιο σύνθετος παράγοντας που εμποδίζει όλες τις παραπάνω μονάδες ΔΠ-ΗΕ να αποτελέσουν τον βασικό πυλώνα που θα στηρίζει την παραγωγή ΗΕ: **Το ίδιο το ηλεκτρικό δίκτυο και για την ακρίβεια τεχνο-οικονομικά θέματα λειτουργίας του ίδιου του ηλεκτρικού δικτύου.**

Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα είναι ότι το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε πριν από πολλά χρόνια με τις παρακάτω προϋποθέσεις:

Α) Η παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας ανήκει σε μία **δημόσια** επιχείρηση ηλεκτρισμού (ΔΕΗ ή αντίστοιχη άλλων χωρών).

Β) Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι **συγκεντρωμένη**, δηλαδή παράγεται σε μεγάλες ποσότητες από μερικές μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (της τάξεως των μερικών GW), άρα από εκείνες τις περιοχές αναχωρούν γραμμές υψηλής τάσης με μεγάλη χωρητικότητα σε μεταφερόμενη ισχύ.

Γ) Η ισχύς ρέει προς μία κατεύθυνση από τις μεγάλες μονάδες παραγωγής προς τους καταναλωτές. Κατά συνέπεια σε ορισμένες ορεινές ή παραμεθόριες και συνήθως αραιοκατοικημένες περιοχές, το ηλεκτρικό δίκτυο σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των τοπικών καταναλωτών.

Δ) Ο έλεγχος του δικτύου γίνεται από μερικά κεντρικά σημεία ελέγχου. Από τα σημεία αυτά παράγονται και εντολές για κάθε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να αυξήσει ή να μειώσει την παρεχόμενη ενεργή ή άεργη ισχύ.

Στο ίδιο λοιπόν ηλεκτρικό δίκτυο, που σχεδιάστηκε με τις παραπάνω προϋποθέσεις, πρέπει στις ημέρες μας η ηλεκτρική ισχύς να παραχθεί, να μεταφερθεί και να διανεμηθεί στους καταναλωτές, με την ίδια αξιοπιστία και ποιότητα, αλλά με τις παρακάτω εντελώς διαφορετικές προϋποθέσεις:

Α) Η πλειονότητα των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικά οι μονάδες ΑΠΕ δεν ανήκουν σε δημόσιο φορέα, αλλά σε ιδιωτικές επιχειρήσεις κερδοσκοπικού χαρακτήρα. Το ίδιο συμβαίνει και στη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι είναι απαραίτητη η μέτρηση της κατανάλωσης και παραγωγής ΗΕ σε πολλά σημεία του δικτύου και η σύναψη συμβολαίων μεταξύ των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας και του φορέα που αναλαμβάνει τη μεταφορά της ΗΕ, όπως και μεταξύ του φορέα που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια και αυτών που τη διανέμουν. Τα συμβόλαια αυτά πρέπει να διέπονται από κάποιες αρχές, που αφορούν στην τιμή αγοράς-πώλησης της ΗΕ και στον τρόπο-διάρκεια λειτουργίας των μονάδων παραγωγής. Με πιο απλά λόγια, η παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας θα πραγματοποιείται στα πλαίσια της «Απελευθερωμένης Αγοράς Ενέργειας».

Β) Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι **διανεμημένη**, δηλαδή παράγεται σε μικρές ποσότητες από μικρές μονάδες (της τάξης των μερικών MW), κυρίως ΑΠΕ, που εντοπίζονται σε διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις από τις συγκεντρωμένες μεγάλες μονάδες παραγωγής. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν υπάρχει η δυνατότητα για τις μονάδες αυτές να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί επιπλέον ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά πρέπει να συνδεθούν στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής.

Γ) Η ισχύς δεν ρέει πάντα προς μία κατεύθυνση στην ίδια γραμμή. Το σημαντικότερο είναι όμως ότι οι απομακρυσμένες περιοχές (ορεινές, παραμεθόριες) και συνήθως αραιοκατοικημένες έχουν πάρα πολύ υψηλό αιολικό, ηλιακό και υδάτινο δυναμικό, αλλά χαμηλή κατανάλωση.

Δ) Ακριβώς επειδή οι μονάδες παραγωγής είναι ιδιωτικών συμφερόντων, πολλές και διεσπαρμένες γεωγραφικά, τα φαινόμενα-προβλήματα που παρατηρούνται στα τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα μπορεί να μην παρατηρούνται σε άλλα σημεία του ηλεκτρικού δικτύου μιας χώρας. Κατά συνέπεια, θα χρειαστούν πολύ περισσότερα κέντρα ελέγχου, κάτι το οποίο είναι αδύνατον τεχνικά και οικονομικά, αν έχουν τη μορφή που έχουν μέχρι σήμερα.

Για να γίνει αντιληπτό τι προβλήματα προκύπτουν στο ηλεκτρικό δίκτυο από τη λειτουργία με τις νέες προϋποθέσεις παραθέτουμε δύο παραδείγματα, ένα από τη Δυτική Ευρώπη και από τη χώρα μας:

- Στη Βόρεια Γερμανία, όπου το αιολικό δυναμικό είναι το υψηλότερο της χώρας, εντοπίζονται τα περισσότερα αιολικά πάρκα. Εκεί, συχνά το **τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο** φτάνει στα όριά του (ανύψωση τάσης, συχνότητας και φόρτιση γραμμών), όταν οι παραγόμενες ισχύεις από τα αιολικά πάρκα αγγίζουν **ταυτόχρονα** τις ονομαστικές τους τιμές. Οι συνέπειες του γεγονότος αυτού είναι πολλαπλές:

(α) η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος μειώνεται, καταπονείται το ηλεκτρικό δίκτυο και αυξάνεται η πιθανότητα σφαλμάτων,

(β) πολλές μονάδες βιοαερίου ή βιομάζας παίρνουν εντολή να σταματήσουν να παρέχουν ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο για συγκεκριμένη χρονική περίοδο, σπαταλώντας πρώτη ύλη,

(γ) Τα συμβόλαια των μονάδων βιοαερίου ή βιομάζας υποχρεώνουν το διαχειριστή του δικτύου να πληρώσει τους ιδιοκτήτες των μονάδων βιοαερίου ή βιομάζας, χωρίς να έχουν παράσχει στο ηλεκτρικό δίκτυο την προβλεπόμενη ηλεκτρική ισχύ.

Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και στην Ελλάδα, σε περιοχές όπου έχουν πρόσφατα κατασκευαστεί πολλά φωτοβολταϊκά πάρκα ή Μικροί ΥΗΣ. Αν και έχει προηγηθεί μελέτη πριν την εγκατάστασή τους, αλλαγές όπως η μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης λόγω της οικονομικής κρίσης στην Ελλάδα ή άλλοι αστάθμητοι παράγοντες οδηγούν πάλι το **τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο** στα όριά του (ανύψωση τάσης, συχνότητας και φόρτιση γραμμών), όταν οι παραγόμενες ισχύεις από τα Φ/Β πάρκα ή τους μικρούς ΥΗΣ αγγίζουν **ταυτόχρονα** τις ονομαστικές τους τιμές. Επίσης, έντονα μεταβατικά φαινόμενα κατά την σύνδεση Φ/Β πάρκων σε τοπικό επίπεδο παρατηρούνται συχνά, που καταπονούν το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα παραπάνω φαινόμενα όχι μόνο μειώνουν την ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο, αλλά καθιστούν απαγορευτική τεχνικά την αδειοδότηση επιπλέον μονάδων ΔΠ-ΗΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο.

2. Το έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο

Από όλα τα παραπάνω, συνάγεται το συμπέρασμα ότι επειδή οι μονάδες παραγωγής είναι ιδιωτικών συμφερόντων, πολλές και διεσπαρμένες γεωγραφικά, τα φαινόμενα-προβλήματα που παρατηρούνται στα τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα μπορεί να μην παρατηρούνται σε άλλα σημεία του ηλεκτρικού δικτύου μιας χώρας. Κατά συνέπεια, θα χρειαζόταν πολύ περισσότερα κέντρα ελέγχου και διαχείρισης του δικτύου, κάτι το οποίο είναι αδύνατον τεχνικά και οικονομικά, αν έχουν τη μορφή που έχουν μέχρι σήμερα.

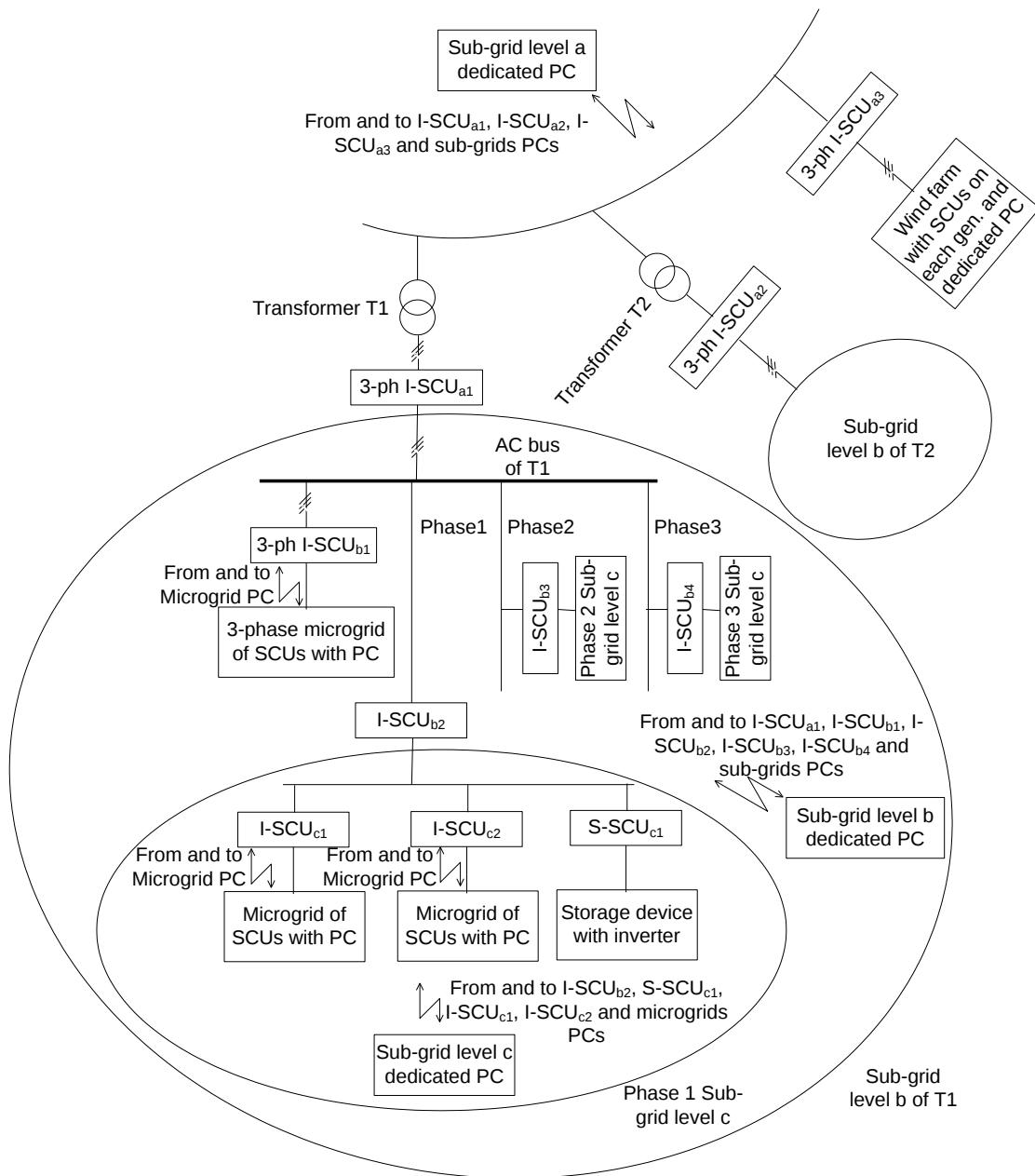
Όλοι οι παραπάνω λόγοι οδηγούν αναπόφευκτα σε μεταμόρφωση του υπάρχοντος δικτύου. Από ένα δίκτυο όπου η παραγωγή είναι συγκεντρωμένη, όπου η ισχύς ρέει προς μία κατεύθυνση και οι διαχειριστικές αρχές ελέγχουν το δίκτυο σε ένα δίκτυο, όπου η παραγωγή ενέργειας είναι διανεμημένη, όπου η ισχύς ρέει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και οι αρχές ή εταιρείες διαχείρισης δεν έχουν τον έλεγχο του δικτύου [1], [2]. Αυτός ο τύπος δικτύου φαίνεται απρόβλεπτος και για να μπορέσει να ελεγχθεί, είναι απαραίτητος ο τοπικός αυτόνομος έλεγχος του δικτύου από ευφυή συστήματα ελέγχου. Για αυτό, το μελλοντικό αυτό δίκτυο αποκαλείται έξυπνο ή ευφυές δίκτυο.

2.1 Πιθανοί τρόποι υλοποίησης του έξυπνου δικτύου, ως λύσης για την αύξηση της διείσδυσης μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο ηλεκτρικό δίκτυο

Ένας πρώτος τρόπος βελτίωσης της μειωμένης αξιοπιστίας και ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος από αυτή τη μεταμόρφωση του δικτύου είναι η ένταξη αποθηκευτικών μέσων κοντά στις μονάδες κατανεμημένης παραγωγής, που θα προσφέρουν άμεση κάλυψη της ζήτησης. Συνεπώς, ο καθορισμός του επιπέδου φόρτισης (State of Charge - SoC) των αποθηκευτικών μέσων σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητος για την αξιοπιστία του δικτύου [3], [4]. Ο έλεγχος του επιπέδου φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης, εφόσον βρίσκονται κοντά σε μονάδες κατανεμημένης παραγωγής, δεν μπορεί να είναι κεντρικός, αλλά τοπικός.

Αυτό που μένει λοιπόν είναι ο διανεμημένος έλεγχος του δικτύου. Λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η ανάπτυξη μιας τοπολογίας ηλεκτρικού δικτύου και της αντίστοιχης υποδομής ελέγχου που θα μπορεί να εφαρμοστεί από τα οικιακά δίκτυα μέχρι το δίκτυο διανομής. Όμως αυτή η υποδομή ελέγχου πρέπει να είναι συμβατή με υπάρχουσες τεχνολογίες ελέγχου της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων. Πρέπει επίσης να αλληλεπιδρά με το σύστημα ελέγχου του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για να μπορέσει να εκμεταλλευτεί τα οφέλη των βοηθητικών υπηρεσιών του έξυπνου δικτύου. Για αυτό πρέπει να διεξαχθούν εκτεταμένες μετρήσεις και δοκιμές προσομοίωσης. [5], [6]. Η τοπολογία αυτή πρέπει να είναι εφαρμόσιμη από το μικρότερο δίκτυο, όπως είναι το οικιακό δίκτυο μέχρι όλο το δίκτυο διανομής, το οποίο κατά συνέπεια πρέπει να

χωριστεί - από την μεριά του ελέγχου - σε μικρότερα, διασυνδεδεμένα, παράλληλα υποδίκτυα. Κάθε υποδίκτυο περιλαμβάνει με τη σειρά του εμφωλευμένα, μικρότερα δίκτυα (μικροδίκτυα), κοκ. Κάθε υποδίκτυο, οποιουδήποτε επιπέδου, πρέπει να μπορεί να αποσυνδέεται από το υπόλοιπο δίκτυο και να λειτουργεί αυτόνομα ή νησιδοποιημένα (islanded mode of operation). Άρα πρέπει να είναι αυτοελεγχόμενο. Στο σχήμα 7 φαίνεται παραστατικά η παραπάνω οργάνωση του μελλοντικού έξυπνου δικτύου.



Σχήμα 7: Προτεινόμενη τοπολογία έξυπνου ηλεκτρικού δικτύου.

2.2 Το μικροδίκτυο ως απαραίτητη δομική μονάδα του έξυπνου ηλεκτρικού δικτύου – ορισμός και χαρακτηριστικά, τοπολογίες

Όπως φαίνεται από το σχήμα 7, είναι προφανής ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζουν τα **μικροδίκτυα** στο μελλοντικό δίκτυο. Τα Μικροδίκτυα περιλαμβάνουν χαμηλής ή μέσης τάσης (LV-MV) συστήματα διανομής με μονάδες ΔΠ-ΗΕ, συστήματα αποθήκευσης και ελεγχόμενα φορτία ενώ προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες ελέγχου επί της λειτουργίας του δικτύου [7]. Τα συστήματα αυτά συνδέονται με το Μέσης Τάσης (MV) ή χαμηλής τάσης (LV) δίκτυο διανομής, αλλά μπορούν επίσης να λειτουργήσουν σε μια απομονωμένη λειτουργία κατά τη διάρκεια βλάβης. Από την άποψη του πελάτη, τα Μικροδίκτυα μπορούν να καλύπτουν τόσο θερμικές και ηλεκτρικές ανάγκες, ενώ θα μειώσουν επίσης τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, θα ενισχύσουν την αξιοπιστία, θα βελτιώσουν την ποιότητα της ισχύος υποστηρίζοντας την τάση, και ενδεχομένως να μειώσουν το κόστος του ενεργειακού εφοδιασμού.

Εδώ περιγράφονται αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά και σημεία προσοχής των μικροδικτύων και αναλύονται οι δύο επικρατέστερες τοπολογίες ελέγχου των μικροδικτύων.

2.2.1. Ορισμός και χαρακτηριστικά των μικροδικτύων

Κατά τη συζήτηση υποδομών ‘έξυπνου δικτύου’, οι περισσότεροι άνθρωποι σκέφτονται την προσθήκη προηγμένων συσκευών μέτρησης στα σπίτια και τις επιχειρήσεις. Η αυτοματοποίηση και η διανεμημένη νοημοσύνη στα δίκτυα διανομής είναι σε επεξεργασία για σχεδόν δύο δεκαετίες. Σημαντική πρόοδος είναι η δημιουργία ‘αυτοθεραπευόμενων’ δικτύων διανομής, ή ζωνών όπου οι διακόπτες και οι προστατευτικές συσκευές (Intelligent Energy Devices - IEDs) επικοινωνούν σε πραγματικό χρόνο για να απομονωθούν τα σφάλματα και να αποκατασταθεί η λειτουργία του δικτύου, χωρίς να χρειάζονται εντολές SCADA από το κέντρο ελέγχου. Σε επόμενο στάδιο, η προσθήκη της διανεμημένης ενεργειακής αποθήκευσης θα επιτρέπει σε δίκτυα ακόμη και μεγάλης έκτασης να συνεχίσουν την λειτουργία τους ως αυτόνομα ‘island’ δίκτυα σε περίπτωση απώλειας της σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο [8].

Το μικροδίκτυο μπορεί να οριστεί ως ένα τμήμα του «έξυπνου» ηλεκτρικού δικτύου διανομής (Smart Distribution Grid), που περιλαμβάνει κατανεμημένους παραγωγούς, μέσα αποθήκευσης και ελεγχόμενα φορτία, έχει τη δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας – νησιδοποίησης, και αυτοελέγχεται από ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου μικροδικτύων (Microgrid Management System - MMS). Κατά τη διασυνδεδεμένη λειτουργία του, μπορεί να αντιμετωπιστεί από το υπόλοιπο δίκτυο ή από το υποδίκτυο όπου εντάσσεται ως έξυπνο φορτίο, έξυπνη συσκευή

αποθήκευσης ή έξυπνη διανεμημένη πηγή [9], [10]. Στο Σχ. 8 φαίνονται διάφορες μορφές μικροδικτύων. Όπως προκύπτει από τον ορισμό, τα κυριότερα δομικά χαρακτηριστικά ενός μικροδικτύου είναι:

A) Η διανεμημένη παραγωγή, στην οποία εντάσσονται κυρίως οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας,

B) Τα αποθηκευτικά μέσα,

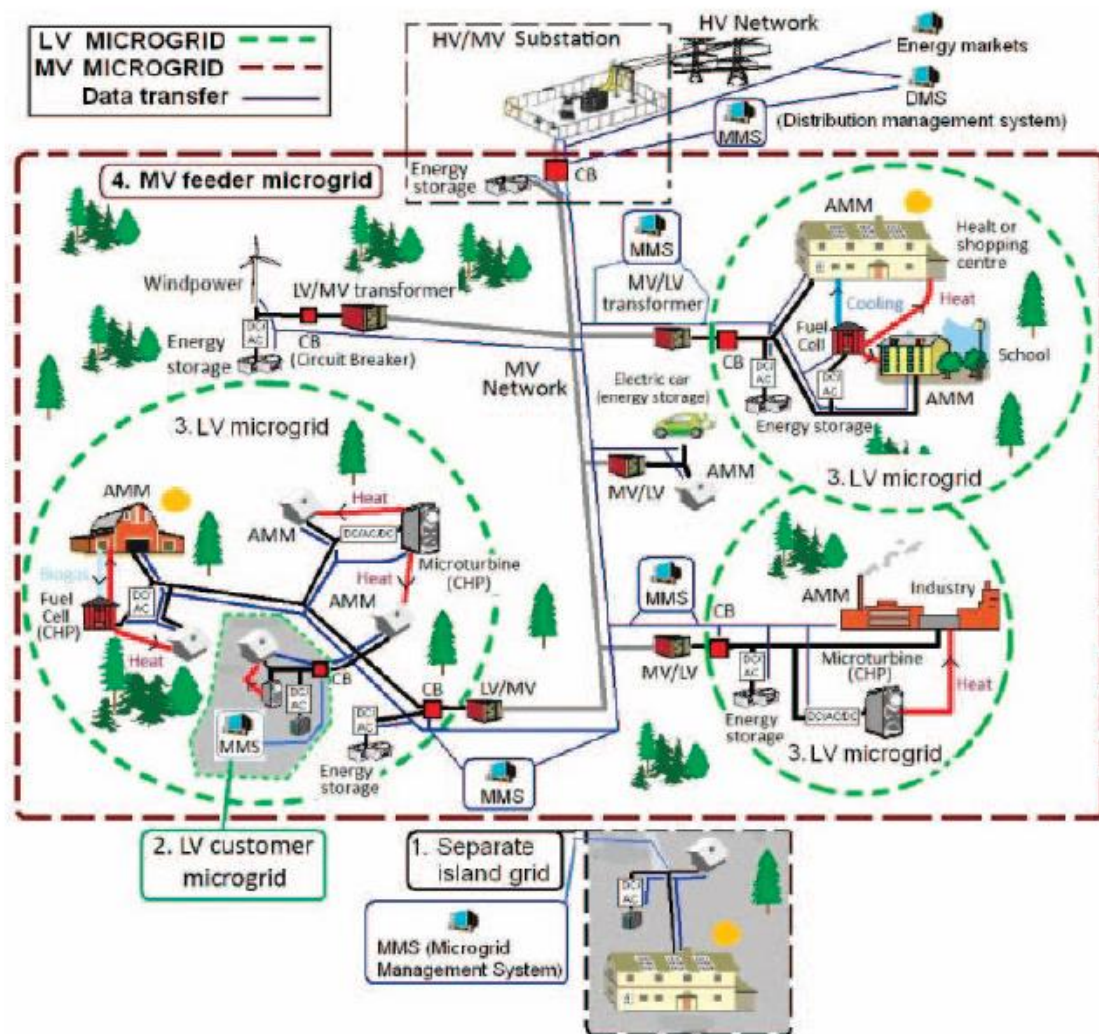
Γ) Τα ελεγχόμενα φορτία

ενώ οι κυριότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά είναι

A) Η λειτουργία νησιδοποίησης και

B) Το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου

Επειδή τα αποθηκευτικά μέσα είναι εντελώς νέα δομικά στοιχεία του δικτύου και η σημασία τους είναι μεγάλη για τον έλεγχο και τη λειτουργία του δικτύου, θα αναλυθούν περαιτέρω σε ξεχωριστό κεφάλαιο, κυρίως από τη σκοπιά του ρόλου τους στο νέο δίκτυο.



Σχήμα 8: Διαφορετικές Μορφές μικροδικτύων [9]

2.2.2 Ελεγχόμενα φορτία

Ο έλεγχος των φορτίων, δηλαδή η γνώση της πραγματικής κατανάλωσης των φορτίων κάθε χρονική στιγμή και η δυνατότητα απόρριψής τους με σκοπό την ευστάθεια ενός δικτύου αποτελεί αντικείμενο έρευνας για πάνω από μία δεκαετία στα πλαίσια της προσπάθειας διαχείρισης της ζήτησης (Demand Side Management - DMS) [11]. Ειδικότερα για ένα μικροδίκτυο, ο έλεγχος των φορτίων είναι ακόμη πιο σημαντικός, όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε λειτουργία νησιδοποίησης και πρέπει να ελεγχθεί τοπικά η τάση και η συχνότητα του απομονωμένου συστήματος. Η γνώση της ζήτησης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη και με τη λειτουργία των μπαταριών [5], [6], [12]. Στις παραπάνω εργασίες, φαίνεται πώς επηρεάζεται η λειτουργία του μικροδικτύου, όταν η πολιτική απόρριψης φορτίων δεν είναι επαρκής.

Περισσότερα για τον έλεγχο φορτίων περιλαμβάνονται στην παράγραφο που περιγράφεται η νησιδοποίηση και στο κεφάλαιο όπου αναλύονται οι τοπολογίες ελέγχου μικροδικτύων. Και αυτό γιατί, όπως σχολιάστηκε παραπάνω, το κάθε μικροδίκτυο αποτελεί ένα «έξυπνο» φορτίο, το οποίο όταν κριθεί απαραίτητο αποκόπτεται από το υπόλοιπο δίκτυο και επειδή η πολιτική απόρριψης φορτίων εξαρτάται άμεσα από την τοπολογία ελέγχου του μικροδικτύου.

2.2.3 Νησιδοποίηση για βελτιωμένη αξιοπιστία

Η νησιδοποίηση είναι ένα σχέδιο στο ηλεκτρικό δίκτυο για να απομονωθούν τμήματα του δικτύου με μια τοπική πηγή ενέργειας σε περίπτωση διακοπής παροχής ενέργειας από το υπόλοιπο σθεναρό δίκτυο. Αυτή η πηγή ενέργειας μπορεί να είναι από ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής ενέργειας μέχρι προηγμένες τεχνολογίες όπως οι κυψέλες καυσίμου ή οι μπαταρίες. Η δυνατότητα νησιδοποίησης είναι εξαιρετικά ευεργετική όταν χάνεται η παροχή ενέργειας από το υπόλοιπο δίκτυο, γεγονός που μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια σφάλματος στο ηλεκτρικό σύστημα. Αυτή η δυνατότητα βελτιώνει την αξιοπιστία και εξασφαλίζει ότι οι διακοπές για τους πελάτες περιορίζονται στο ελάχιστο. Αυτό το πλεονέκτημα είναι πολύ σημαντικό για ηλεκτρικά δίκτυα, ειδικά στις περιοχές με συχνές διακοπές ηλεκτροδότησης. Οι περιοχές που θα ωφεληθούν αρκετά περιλαμβάνουν:

- Εκείνες όπου τα φορτία τροφοδοτούνται από παλαιές, μακριές γραμμές.
- Περιοχές με πυκνή βλάστηση (η βλάστηση μπορεί να έρθει σε επαφή με τις ηλεκτρικές γραμμές και μπορεί να προκαλέσει τις διακοπές)
- Θέσεις υποκείμενες στις συχνές φυσικές διαταραχές όπως τους ανεμοστρόβιλους και τις θύελλες.

Η δυνατότητα νησιδοποίησης είναι μεγάλου οφέλους επειδή η διαδικασία αποκατάστασης μιας βλάβης στο υπάρχον δίκτυο μπορεί να είναι χρονοβόρα. Οι δυσκολίες που αντιμετωπίζονται

σήμερα κατά τη διαδικασία αποκατάστασης περιλαμβάνουν: συγκέντρωση του προσωπικού, ανεξάρτητα από το χρόνο της ημέρας, εντοπισμό του σφάλματος, το οποίο μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολο επειδή οι ηλεκτρικές γραμμές μπορούν να απλώνονται για πολλά χιλιόμετρα, και την επισκευή και αποκατάσταση, που μπορεί να διαρκέσει πολλή ώρα. Ενώ αυτή η εκτενής διαδικασία πραγματοποιείται, οι πελάτες που εξυπηρετούνται από εκείνη την ηλεκτρική γραμμή είναι χωρίς ενέργεια, μερικές φορές για πολλές ώρες. Η νησιδοποίηση, εντούτοις, δημιουργεί τη δυνατότητα οι περισσότεροι εάν όχι όλοι εκείνοι οι πελάτες να εξυπηρετούνται από μια τοπική πηγή ενώ η προσπάθεια αποκατάστασης βρίσκεται σε εξέλιξη [13].

Πολυάριθμα οφέλη υπάρχουν από τη δυνατότητα «έξυπνης» νησιδοποίησης τμημάτων του δικτύου, όταν εμφανίζεται ένα σφάλμα, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που απαριθμούνται εδώ.

- Βελτιωμένοι δείκτες αξιοπιστίας: Δείκτες αξιοπιστίας όπως ο δείκτης μέσης διάρκειας διακοπής πελατών (CAIDI) και δείκτης μέσης διάρκειας διακοπής συστήματος (SAIDI) είναι τυποποιημένα μέτρα αξιοπιστίας. Η νησιδοποίηση μπορεί σημαντικά να βελτιώσει αυτούς τους δείκτες, δεδομένου ότι λιγότεροι πελάτες θα είναι χωρίς ενέργεια και οι διακοπές θα είναι πιο σύντομες σε διάρκεια.

- Βελτιστοποίηση χρήσης των πόρων: Είναι δυνατός ο καθορισμός προτεραιοτήτων στη διαδικασία αποκατάστασης, επιτρέποντας λιγότεροι άνθρωποι και φυσικοί πόροι να επικεντρωθούν πρώτα σε μη-νησιδοποιημένες περιοχές. Θα σωθούν άνθρωποι και οικονομικοί πόροι, δεδομένου ότι τα πληρώματα δεν θα χρειαστεί να αποσταλούν σε περιοχές κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών και να πληρώνονται υψηλότερα ποσοστά υπερωριών. Ανάλογα με τη φύση της διακοπής λειτουργίας, μπορούν να είναι σε θέση να χειριστούν την αποκατάσταση ως τμήμα των κανονικών καθημερινών προγραμμάτων τους.

- Αναβολή χρήσης κεφαλαίου: Η νησιδοποίηση μπορεί να παρέχει μια άμεση αποτύπωση για ένα προβληματικό δίκτυο και επιτρέπει την αναβολή χρήσης των παραδοσιακών λύσεων (κατασκευή σταθμών και / ή διεύρυνση, επέκταση δικτύου μεταφοράς, και αύξηση υποσταθμών διανομής) μέχρι το δίκτυο να μπορεί να επανασχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα οφέλη που περιγράφονται ανωτέρω, το ερώτημα που προκύπτει είναι ποιος είναι ο πρακτικότερος τρόπος για να επιτύχει πραγματικά η νησιδοποίηση; Από την ανάλυση διαφόρων τρόπων προτάθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες διαχείρισης φορτίων [13].

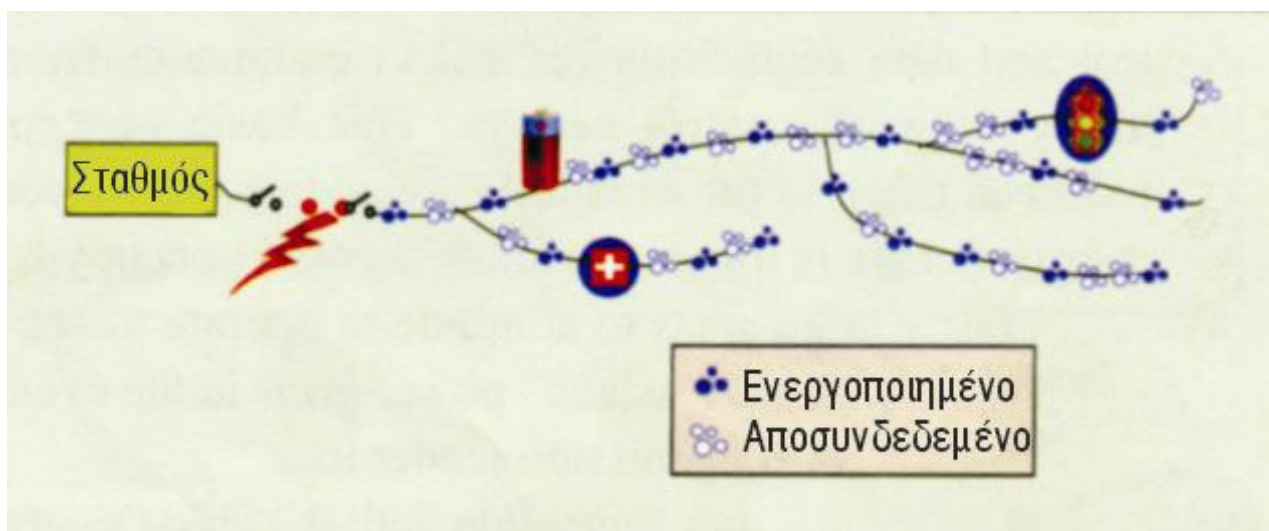
Αυτές είναι 1) η προσαρμοσμένη δυναμική νησιδοποίηση (ADI) και 2) η διακριτή δυναμική νησιδοποίηση (DDI).

ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ (Adapted Dynamic Islanding-ADI)

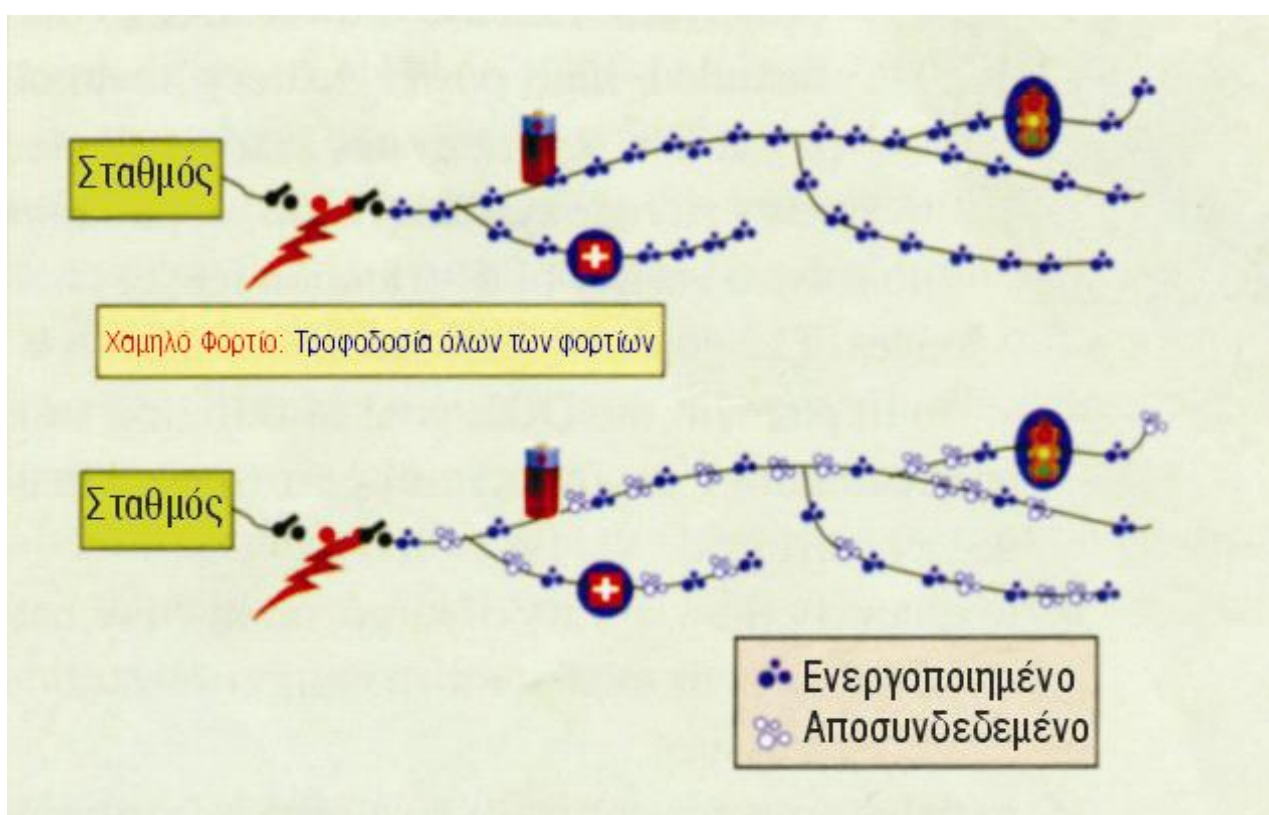
Η ADI στηρίζεται στη δυνατότητα των εταιρειών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας να ανοίγουν ή να κλείνουν την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από απόσταση σε μεμονωμένους καταναλωτές μέσω υποδομής προηγμένων μετρητών (Advanced Metering Infrastructure-AMI). Μόλις η υποδομή AMI αναπτυχθεί αρκετά, η προσαρμοσμένη δυναμική νησιδοποίηση θα καταστεί δυνατή όσο αφορά στην εφαρμογή και τον έλεγχο (Σχήματα 9 και 10). Τότε η ADI θα δώσει τη δυνατότητα στους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας να μεταχειρίζονται κάθε φορτίο πελατών σαν «νησί». Όταν η τεχνολογία AMI πετύχει ένα αρκετά υψηλό επίπεδο διείσδυσης, ο ηλεκτρικός μετρητής κάθε πελάτη θα είναι σε θέση να ελεγχθεί με τηλεχειρισμό. Κατά συνέπεια σε ορισμένα κρίσιμα φορτία όπως των νοσοκομείων, αστυνομικών τμημάτων, και Πυροσβεστικών σταθμών θα μπορούσε να δοθεί προτεραιότητα σε περίπτωση διακοπών ηλεκτρικής ενέργειας. Ομοίως, θα ήταν δυνατόν λιγότερο - κρίσιμα φορτία πελατών κατά τη διάρκεια της διακοπής να μοιραστούν τη διαθέσιμη ενέργεια και να καταναείμουν τα οφέλη της νησιδοποίησης.

Το σχήμα 9 επεξηγεί εννοιολογικά πως το σύστημα διαχείρισης μπαταριών θα μπορούσε επιλεκτικά να αποσυνδέει ή να ανακυκλώνει μερικά φορτία πελατών εξασφαλίζοντας ότι οι υψηλότερης προτεραιότητας πελάτες παραμένουν ενεργοποιημένοι καθ' όσο είναι δυνατό. Το σχήμα 10 επεξηγεί πώς η δυνατότητα να συνδεθούν από απόσταση ή να αποσυνδεθούν μεμονωμένα φορτία θα αφήσει το σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης να διαχειριστεί έξυπνα το φορτίο που τροφοδοτεί, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το μέγεθος της εφαρμογής της νησιδοποίησης, σεβόμενο το μέγεθος της διαθέσιμης αποθηκευμένης ενέργειας. Η νησιδοποίηση θα μπορούσε ουσιαστικά να κάνει ανεπαίσθητες τις διακοπές ρεύματος που εμφανίζονται σε ώρες μη-αιχμής ενώ οι διακοπές σε ώρες αιχμής θα μετριάζονταν, ανάλογα με τη διάρκεια της διακοπής. Στο ADI σχέδιο θα ήταν πολύ απλό να ρυθμιστεί ο αριθμός πελατών που συνδέονται με βάση τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια στην μπαταρία. Σε ώρες χαμηλών-φορτίων, η χωρητικότητα της μπαταρίας θα ήταν επαρκής να τροφοδοτήσει ολόκληρο το τμήμα του δικτύου νησιδοποίησης. Για τις καταστάσεις στις οποίες η μπαταρία δεν θα μπορούσε να τροφοδοτήσει ολόκληρο το τμήμα, επιλεγμένα φορτία θα ενεργοποιούνταν ή θα ανακυκλώνονταν όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 10.

[13]



Σχήμα 9: ADI [13]

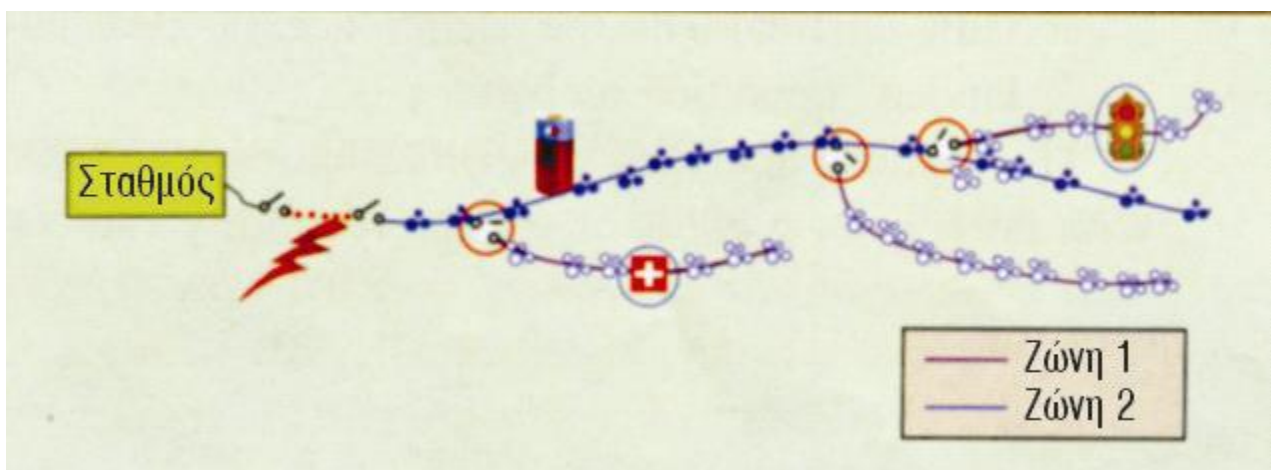


Σχήμα 10: Τροφοδότηση μεμονωμένων φορτίων σε περιόδους υψηλής ζήτησης. [13]

Η ΔΙΑΚΡΙΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ (Discrete Dynamic Islanding-DDI)

Η DDI περιγράφει τη δυνατότητα να συνδεθούν και να αποσυνδεθούν διακριτά τμήματα ή ζώνες του δικτύου (τμήματα τροφοδοτών) αντί του κάθε πελάτη, όπως στο ADI σχέδιο που περιγράφεται ανωτέρω. Κατά συνέπεια, κάθε τμήμα του δικτύου όπου γίνεται νησιδοποίηση θα περιλάβει αρκετά κατοικημένα και εμπορικά κτήρια. Αυτός ο τύπος νησιδοποίησης γίνεται πιθανός μέσω της χρήσης προηγμένων συστημάτων επικοινωνίας και ελέγχου που υιοθετούν τη διανεμημένη νοημοσύνη μεταξύ των τροφοδοτών και των προστατευτικών συσκευών (IEDs). Αυτές έπειτα επικοινωνούν άμεσα η μία με την άλλη, για να απομονώσουν αυτόματα τα σφάλματα

και να αποκαταστήσουν την παροχή στα υγιή τμήματα γραμμών. Αυτή η μέθοδος νησιδοποίησης αποδείχθηκε να είναι ευκολότερη και γρηγορότερη να εφαρμοστεί, δεδομένου ότι η βασική τεχνολογία και το απαραίτητο υλικό είναι διαθέσιμα σήμερα. Είναι επίσης ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι η DDI θα έτεινε μόνο να συμπληρώσει την ADI εάν και όταν οι προϋποτιθέμενες AMI τεχνολογίες αναπτυχθούν. Και οι δύο μέθοδοι είναι αποτελεσματικές, όταν τα σφάλματα στο δίκτυο εντοπίζονται ένα επίπεδο πάνω από το νησιδοποιημένο τμήμα, αλλά η DDI είναι υποχρεωτική εάν η νησιδοποίηση είναι να υποστηριχθεί κατά τη διάρκεια οποιωνδήποτε σφαλμάτων που εμφανίζονται μέσα στη νησιδοποίηση. Μόνο η DDI έχει την έμφυτη δυνατότητα να ανιχνεύσει και να απομονώσει αυτόματα τα σφάλματα. Το σχήμα 11 παρουσιάζει την διακριτή (ζωνική) προσέγγιση στον έλεγχο και τη διαχείριση φορτίων βασισμένη στο συνολικό φορτίο σε κάθε ζυγό τροφοδότησης κατά τη στιγμή μιας διακοπής και στο μέγεθος της διαθέσιμης αποθηκευμένης ενέργειας από την μπαταρία. Αυτές οι δύο μεταβλητές ρυθμίζονται βασισμένες στον προβλεπόμενο χρόνο για την αποκατάσταση των ζυγών. [13]



Σχήμα 11: Τροφοδότηση μεμονωμένων φορτίων σε περιόδους υψηλής ζήτησης. [13]

2.2.4 Το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου

Από τα παραπάνω είναι προφανής η σημασία που έχει για τη λειτουργία του μικροδικτύου, άρα και ολόκληρου του δικτύου το σύστημα ελέγχου του (Microgrid Management System - MMS). Το σύστημα ελέγχου μπορεί να είναι ένας υπολογιστής όπου εκτελείται το αντίστοιχο λογισμικό ή ένας κεντρικός ελεγκτής που ελέγχει την ευστάθεια του δικτύου και τη ροή ενέργειας ή μπορεί να είναι σύνολο συσκευών με διανεμημένη νοημοσύνη που από κοινού ελέγχουν το μικροδίκτυο. Το σύστημα ελέγχου όμως δεν μπορεί να υλοποιηθεί, εάν δεν αποτελείται από δύο βασικές υποδομές: Το σύστημα μετρήσεων και από το σύστημα επικοινωνίας. Όταν διατίθενται αυτές οι υποδομές σε ένα μικροδίκτυο, τότε το σύστημα ελέγχου καλείται να αναλάβει τις ακόλουθες λειτουργίες:

1) Ρύθμιση τάσης και συχνότητας κατά τη στάσιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, ειδικά όταν το μικροδίκτυο είναι νησιδοποιημένο. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται

κατά κύριο λόγο είναι η ελαφρώς παραλλαγμένη ειδικά για μικροδίκτυα μέθοδος droop-control [14]-[16]. Παρόλα αυτά για να αντιμετωπιστούν και άλλα ζητήματα όπως η κάλυψη της ζήτησης με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος, η μέθοδος αυτή ενισχύεται και με άλλες [14]-[16].

2) Γρήγορη αντιστάθμιση ενεργής και άεργου ισχύος με όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Για παράδειγμα στις [5], [6] φαίνεται ότι ένα μικροδίκτυο που ελέγχεται από έναν κεντρικό ελεγκτή πετυχαίνει παροχή των φορτίων, χωρίς όμως να αξιοποιεί τη διαθέσιμη ενέργεια του ήλιου.

3) Εκτίμηση του επιπέδου φόρτισης (SoC) των αποθηκευτικών μέσων. Ουσιαστικά οι σχετικές μέθοδοι που θα αναφερθούν στο κεφάλαιο των μπαταριών υλοποιούνται εδώ.

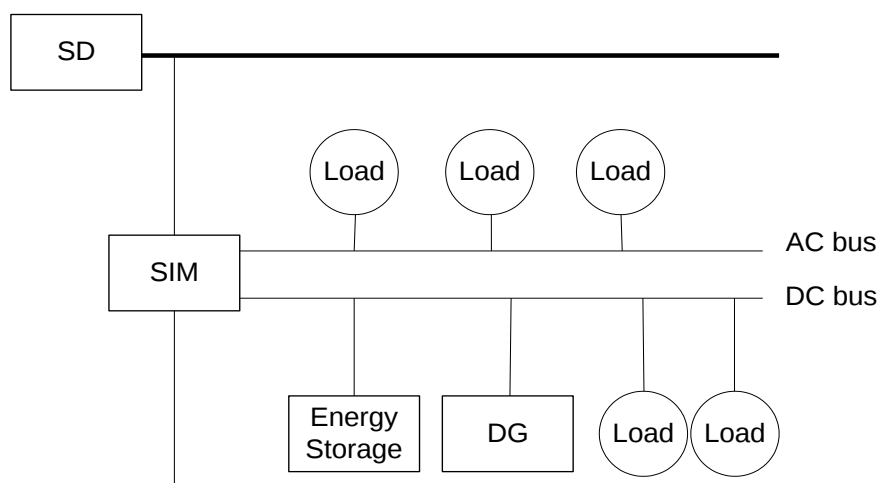
4) Με βάση την εκτίμηση του SoC γίνεται εκτίμηση των δεικτών αξιοπιστίας του μικροδικτύου και καθορίζεται η πολιτική μερικής απόρριψης φορτίων. Σε αυτή την περίπτωση φυσικά τα φορτία πρέπει να χωριστούν σε περισσότερο και λιγότερο κρίσιμα, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της νησιδοποίησης.

5) Διαλειτουργικότητα με γειτονικά μικροδίκτυα και απόφαση νησιδοποιημένης ή όχι λειτουργίας.

2.2.5 Τοπολογίες ελέγχου μικροδικτύων

Πριν αναπτυχθούν οι υποδομές που αναφέρθηκαν παραπάνω για την υλοποίηση του έξυπνου δικτύου και την εφαρμογή του συστήματος ελέγχου μικροδικτύων, πρέπει να καθοριστεί μια τοπολογία ελέγχου μικροδικτύων που θα είναι επεκτάσιμη σε όλο το δίκτυο διανομής. Δύο είναι οι τοπολογίες που εφαρμόζονται ή θα εφαρμοστούν.

Η πρώτη τοπολογία του δικτύου διανομής φαίνεται στο σχήμα 3.1 [1].



Σχ. 12: Η πρώτη τοπολογία.

Η μονάδα SIM θα έχει τις ακόλουθες λειτουργίες:

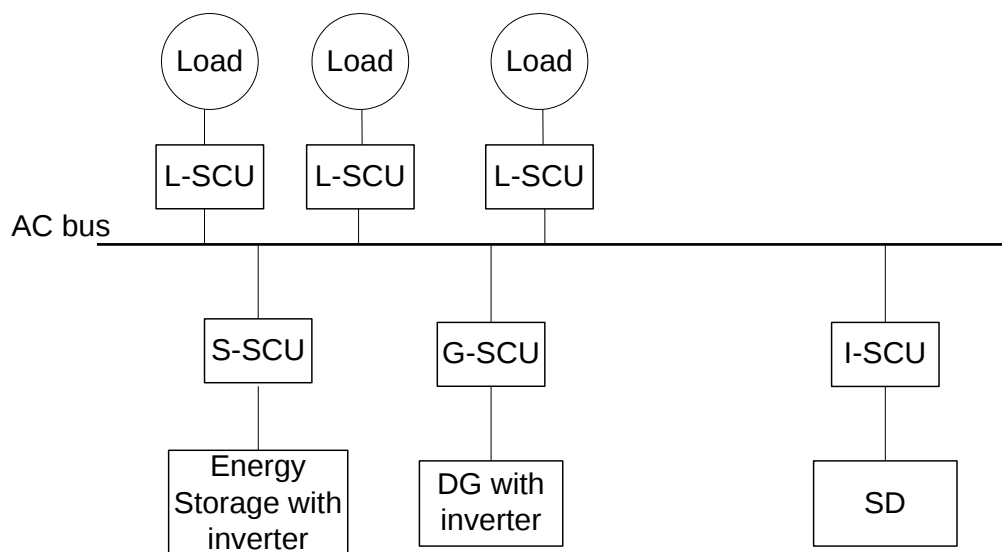
- Σύνδεση στο υπόλοιπο δίκτυο (SD).
- Ζυγό AC για φορτία AC.
- Ζυγό DC για φορτία DC και σύνδεση στην ενεργειακή αποθήκη και διανεμημένη

παραγωγή από ΑΠΕ.

- Ρύθμιση τάσης σε στάσιμη ή μεταβατική κατάσταση.
- Γρήγορη παροχή πραγματικής και άεργης ισχύος.
- Δυνατότητα απόρριψης φορτίου.

Σ' αυτό το σύστημα διανομής, ο αυτόνομος, έξυπνος έλεγχος θα διεξάγεται από όλες τις SIM του δικτύου. Σ' αυτή την περίπτωση, οι βασικές πληροφορίες που θα πρόκειται να ανταλλάσσονται μεταξύ δύο SIM θα είναι οι ανάγκες σε ενέργεια ή η διαθεσιμότητα του μικροδικτύου που βρίσκεται «πίσω» από την κάθε SIM. Η κάθε SIM θα αποφασίζει για το αν το μικροδίκτυο της θα λειτουργήσει αυτόνομα (Island-Mode) ή συνδεδεμένο με το δίκτυο (Grid Mode).

Η δεύτερη τοπολογία φαίνεται στο Σχήμα 13 [5], [6]. Δεν χρειάζεται DC ζυγός, αφού κάθε dc συσκευή συνοδεύεται από τον αντιστροφέα της. Οι Ειδικές Μονάδες Ελέγχου (Special Control Units - SCUs) κατηγοριοποιούνται σε SCU φορτίου (L-SCU), σε SCU αποθήκευσης (S-SCU), SCU γεννήτριας (G-SCU) και SCU διασύνδεσης (I-SCU), για να συνδεθεί το δίκτυο του ζυγού AC στο υπόλοιπο δίκτυο (SD). Όλες οι SCU θα αποτελούνται από μία απλή υπομονάδα μέτρησης, μία υπομονάδα επικοινωνίας, μία υπομονάδα ενεργοποίησης και μία έξυπνη υπομονάδα η οποία χειρίζεται τη λήψη αποφάσεων της κάθε SCU και άρα καθορίζει και τον τύπο της (L-, S-, G- ή I-SCU). Η τελευταία αυτή υπομονάδα θα είναι ουσιαστικά ενσωματωμένη σε ένα λογισμικό που θα εκτελείται στον υπολογιστή ελέγχου του αντίστοιχου μικροδικτύου



Σχ. 13: Η δεύτερη τοπολογία.

Θα ήταν χρήσιμο να συγκρίνουμε τα μειονεκτήματα των δύο προαναφερθέντων αρχιτεκτονικών. Η πρώτη αρχιτεκτονική έχει τρία βασικά μειονεκτήματα:

Μπορεί να είναι μια ακριβή λύση για τις εταιρείες διαχείρισης του δικτύου, μιας και θα πρέπει να κατασκευαστεί απαραίτητως ένα δίκτυο DC και να εγκατασταθούν σ' αυτό οι ακριβές SIM. Έτσι περιορίζεται η επεκτασιμότητα αυτής της τοπολογίας στο δίκτυο διανομής.

Στο υπάρχον δίκτυο τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ήδη συνδεδεμένα με το δίκτυο AC, μέσω των αντιστροφικών διασύνδεσης, ενώ σε αυτή την αρχιτεκτονική προτείνεται η σύνδεση των Φ/Β κατευθείαν στο DC δίκτυο χωρίς τη χρήση αντιστροφεών.

Είναι μια τοπολογία που ο έλεγχος είναι κεντρικός. Έτσι, για παράδειγμα, σε περίπτωση σφάλματος της SIM όλο το μικροδίκτυο τίθεται εκτός λειτουργίας. Επίσης, δεν μπορεί να εφαρμοστεί απόρριψη επιμέρους φορτίων και μακροπρόθεσμος ενεργειακός σχεδιασμός. Αυτό είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας αφού είναι γνωστό ότι η λειτουργία του δικτύου είναι στενά συνδεδεμένη με τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των μικροδικτύων που το απαρτίζουν [10], [17].

Η δεύτερη αρχιτεκτονική μπορεί να έχει το ακόλουθο μειονέκτημα:

Μπορεί να είναι μια ακριβή λύση για τους πελάτες μιας και θα πρέπει να αγοράσουν έναν inverter για κάθε συσκευή αποθήκευσης. Παρ' όλα αυτά, αυτό το επιπλέον κόστος μπορεί να εξισορροπηθεί από το χαμηλό κόστος αγοράς των SCU.

Ένα παράδειγμα μέρους του δικτύου διανομής σε περίπτωση εφαρμογής της δεύτερης τοπολογίας φαίνεται στο σχήμα 7. Το συγκεκριμένο μέρος του δικτύου μπορεί να οργανωθεί σε τρία επίπεδα. (a, b and c). Το επίπεδο-a περιλαμβάνει τρία υποδίκτυα: Αυτό του Μ/Σ T1, του Μ/Σ T2 και το αιολικό πάρκο. Οι I-SCUs αυτών των τριών υποδικτύων ελέγχονται από τον υπολογιστή του επιπέδου a. Αυτό το PC μπορεί να επικοινωνεί και με τους υπολογιστές κάθε υποδικτύου, ώστε να λαμβάνει στοιχεία κατάστασης των τριών μικροδικτύων και να στέλνει πιο εξελιγμένες εντολές. Σε χαμηλότερο επίπεδο η οργάνωση είναι παρόμοια.

3. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας θα παίζει καθοριστικό ρόλο στο μελλοντικό δίκτυο. Επειδή ως γνωστόν η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει όση παράγεται τόση και να καταναλώνεται υπό συγκεκριμένη τάση και συχνότητα, συνήθως αποθηκεύεται με άλλες μορφές. Οι πιο διαδεδομένες σήμερα είναι: (α) οι μπαταρίες, (β) Τα συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου, (γ) Το βιοαέριο.

Αυτό όμως που έχει μεγάλη σημασία για τον έλεγχο ενός μικροδικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με αυξημένη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η γνώση της κατάστασης φόρτισης των μπαταριών ή άλλων αποθηκευτικών μέσων σε κάθε χρονική στιγμή, βάσει μετρήσεων που διενεργούνται σε πραγματικό χρόνο.

Παρακάτω μόνο οι δύο πρώτες μορφές αποθήκευσης θα περιγραφούν, καθώς το βιοαέριο έχει περιγραφεί αναλυτικά παραπάνω.

3.1 Μπαταρίες

Όσον αφορά την αξιοπιστία και το κόστος των αυτόνομων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ή των μικροδικτύων, οι συστοιχίες μπαταριών αποτελούν σημαντικά στοιχεία. Παρόλο που μια συστοιχία μπαταριών αντιπροσωπεύει μόνο το 8% του αρχικού κόστους ενός νέου φωτοβολταϊκού συστήματος, αντιπροσωπεύει το 23% του συνολικού κόστους του συστήματος αν λάβουμε υπόψη την αντικατάσταση των μπαταριών κατά τη διάρκεια του συνολικού χρόνου ζωής του συστήματος (20 έτη) [18]. Οι μπαταρίες αποθήκευσης παρέχουν στο μικροδίκτυο πλεονεκτήματα όπως η δυνατότητα της παροχής ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας και τις ανήλιες περιόδους, την ικανότητα να ανταποκρίνεται στιγμιαία σε φορτία αιχμής και τη σταθεροποίηση της τάσης του συστήματος [19]. Τα ΦΒ συστήματα παραγωγής ενέργειας έχουν υψηλές απαιτήσεις από τις μπαταρίες αποθήκευσης όπως κυρίως το χαμηλό κόστος συντήρησης, την ικανότητα να αντέξουν στην πολύ βαθιά αποφόρτιση και σε υπερφόρτιση, τη σταθερότητα των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης, υψηλή απόδοση φόρτισης και μεγάλη διάρκεια ζωής [19].

Παλαιότεροι τρόποι λειτουργίας χρησιμοποίησαν τα όρια της τάσης μόνο για να προστατέψουν την μπαταρία από την αποφόρτιση και την υπερφόρτωση. Πλέον, ο τρόπος λειτουργίας της μπαταρίας μεταβάλλεται σε αυτό που περισσότερο θα αποκαλούσαμε διαχείριση παρά απλώς προστασία της μπαταρίας. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές έρευνες με σκοπό τη βελτίωση του καθορισμού του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας (SoC). Οι συνθήκες λειτουργίας των μπαταριών διαφέρουν ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους - φωτοβολταϊκές εφαρμογές (PV) ή υβριδικά - ηλεκτρικά οχήματα. Ο λόγος που γίνεται αναφορά στα ηλεκτρικά

οχήματα είναι γιατί αποτελούν τον επικρατέστερο τρόπο για να ενσωματωθεί μεγάλη ποσότητα διανεμημένης αποθήκευσης ενέργειας στα μικροδίκτυα του δικτύου διανομής [20]-[22]. Έτσι λοιπόν, ένας δεδομένος τρόπος υπολογισμού του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας (SoC) θα είναι καταλληλότερος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή απ' ό,τι για κάποια άλλη.

Προκειμένου να μετρήσουμε το επίπεδο φόρτισης, χρειάζεται να γνωρίζουμε πρώτα τι ακριβώς είναι. Στην [23] συνοψίστηκαν διαφορετικοί ορισμοί της χωρητικότητας και του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας (SOC). Σύμφωνα με αυτούς, ένα πλήρες επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (SoC) επιτυγχάνεται όταν (σύμφωνα με το DIN43539) το ρεύμα της μπαταρίας σε συνθήκες σταθερής τάσης και θερμοκρασίας διατηρείται αμετάβλητο για 2 ώρες. Ο ορισμός αυτός δεν περιλαμβάνει το πρόβλημα της φθοράς της μπαταρίας που επιφέρει ο χρόνος ή το επίπεδο υγείας της μπαταρίας (SOH). Στην πραγματικότητα, η χωρητικότητα μιας μπαταρίας ενδέχεται να αλλάξει στη διάρκεια του κύκλου ζωής της εξαιτίας προβλημάτων όπως μείωση της ικανότητας γόμωσης του ενεργού υλικού σε κάποιο από τα ηλεκτρόδια, αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες του ηλεκτρολύτη ή διάβρωση των αγωγών ρεύματος.

Οι δύο τύπους μπαταριών που έχουν χρησιμοποιηθεί για τα ΦΒ συστήματα είναι μολύβδου-οξέος και νικελίου-καδμίου. Λόγω του υψηλότερου κόστους, της χαμηλότερης τάσης κυψελίδας (1,2 V), της χαμηλότερης ενεργειακής απόδοσης και της περιορισμένης ανώτερης θερμοκρασίας λειτουργίας (40 ° C), οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου έχουν απασχοληθεί σε σχετικά λίγα συστήματα. Η χρήση τους βασίζεται κυρίως στην μεγάλη διάρκεια ζωής τους με την μειωμένη συντήρηση και την ικανότητά τους να υφίστανται την βαθιά αποφόρτιση χωρίς φθορές [19]. Η μολύβδου-οξέος μπαταρία θα παραμείνει η σημαντικότερη συσκευή αποθήκευσης στο εγγύς μέλλον, ειδικά σε ΦΒ συστήματα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους [24].

Πριν αναφερθούν οι μέθοδοι καθορισμού επιπέδου φόρτισης, πρέπει να τονιστεί ότι το σφάλμα που εισάγεται από όλες τις μεθόδους καθιστά απαραίτητη τη χρήση ελεγκτή φόρτισης σε σειρά με τη μπαταρία, για να αποφευχθεί υπερφόρτιση ή πλήρης εκφόρτιση της μπαταρίας. Επίσης κατά τη γνώμη του συγγραφέα, η μέθοδος που θα εφαρμοστεί στην πράξη σε ένα μικροδίκτυο, πρέπει να πληροί κάποιες επιπλέον προϋποθέσεις: Να είναι αξιόπιστη, οικονομική, να είναι απλή και εμπορικά εκμεταλλεύσιμη. Το τελευταίο κριτήριο σημαίνει ότι πρέπει να μπορεί να εκτιμηθεί η κατάσταση μιας μπαταρίας ή συστοιχίας μπαταριών από ένα σύστημα που δεν θα χρειάζεται να εγκατασταθεί από ειδικό στις μπαταρίες και συνεπώς δεν θα απαιτεί διαδικασία αρχικοποίησης και αρχικών μετρήσεων. Θα είναι όπως θα λέγαμε με όρους από την επιστήμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών μια μέθοδος “Plug and play”.

Έχοντας υπόψη λοιπόν τα παραπάνω κριτήρια, οι ακόλουθες μέθοδοι είναι οι επικρατέστερες σήμερα:

A) Η μέθοδος μέτρησης της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη (για σταθερούς συσσωρευτές με υγρό ηλεκτρολύτη) [4]. Είναι σχετικά αντι-οικονομική, αφού θα πρέπει να αγοραστεί καινούριος εξοπλισμός μέτρησης χημικών στοιχείων και μάλιστα για όλες τις μπαταρίες του μικροδικτύου. Αυτό σημαίνει επίσης ότι δεν είναι απλή και εμπορικά εκμεταλλεύσιμη.

B) Η μέθοδος ανοικτού κυκλώματος απαιτεί τη διακοπή του κυκλώματος, κάτι που φυσικά είναι ανεπίτρεπτο σε μικροδίκτυα [4].

Γ) Η μέθοδος Coup de Fouet απαιτεί να έχει προηγηθεί πλήρης φόρτιση μπαταριών, κάτι που σχεδόν ποτέ δεν συμβαίνει σε πραγματικά συστήματα [25].

Δ) Τα Νευρωνικά Δίκτυα [26], [27]. Απαιτούνται αξιόπιστα, αρκετά και αντιπροσωπευτικά δεδομένα από φορτίσεις και αποφορτίσεις της μπαταρίας. Αυτό επομένως απαιτεί ότι σε μια συστοιχία μπαταριών θα προηγηθούν εκτενείς δοκιμές φόρτισης και αποφόρτισης, άρα παραβιάζεται το αντίστοιχο κριτήριο που τέθηκε στην αρχή. Επίσης, τα νευρωνικά δίκτυα εισάγουν και κατά τη λειτουργία τους σφάλματα.

Ε) Ο καθορισμός του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας (SOC) με τη χρήση της φασματοσκοπίας της αντίστασης εξακολουθεί να αποτελεί θέμα διαμάχης εξαιτίας της ευαισθησίας στη θερμοκρασία και της δυσκολίας που παρουσιάζει η εφαρμογή της [28].

ΣΤ) Τα πηνία σύρματος είναι αντι-οικονομικά και η μέθοδος κρίνεται ως αρκετά περίπλοκη [4].

Συνεπώς οι μέθοδοι που θεωρήθηκε ότι μπορεί να εφαρμοστούν για εφαρμογές μικροδικτύων είναι η μέθοδος καθορισμού Ah , το γραμμικό μοντέλο, εξαιτίας της απλότητάς του και της καταλληλότητας για φωτοβολταϊκές εφαρμογές και το φίλτρο Kalman.

1) Η μέθοδος υπολογισμού του αριθμού των Ah [4]. Παρέχει σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα στις σύντομες χρονικά εφαρμογές, ιδίως στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες φόρτισης της μπαταρίας. Βέβαια στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές η συχνότητα φόρτισης και εκφόρτισης είναι αρκετά μεγάλη. Επίσης παρουσιάζει δύο σημαντικά προβλήματα: Απαιτεί μεγάλη ακρίβεια μετρήσεων και απαιτεί αναβαθμονόμηση του αρχικού SOC.

2) Το φίλτρο Kalman [4]. Οι υπολογισμοί είναι αρκετά πολύπλοκοι και απαιτούν κάποια αρχικά δεδομένα όπως την τάση ανοικτού κυκλώματος (OCV) και την τάση μετά από 3 ώρες ανάπαυση των μπαταριών (EMF). Σε περίπτωση που τα στοιχεία αυτά δεν δίνονται, πρέπει φυσικά να υπολογιστούν. Η αξιοπιστία όμως της μεθόδου είναι μεγαλύτερη από όλες τις μεθόδους.

3) Το γραμμικό μοντέλο, το οποίο εφαρμόζεται σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα φαίνεται αρκετά αξιόπιστο και απλό, κατάλληλο για φωτοβολταϊκές εφαρμογές και φυσικά σχετικά δοκιμασμένο [4], [29].

Οι τρεις τελευταίες μέθοδοι φαίνονται να είναι πιο πιθανό να ενσωματωθούν συστήματα ελέγχου των μικροδικτύων του μέλλοντος.



Σχήμα 14: Συστοιχίες μπαταριών φωτοβολταϊκών εφαρμογών.

3.2 Συστήματα κυψελών καυσίμου

3.2.1. Παραγωγή του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού

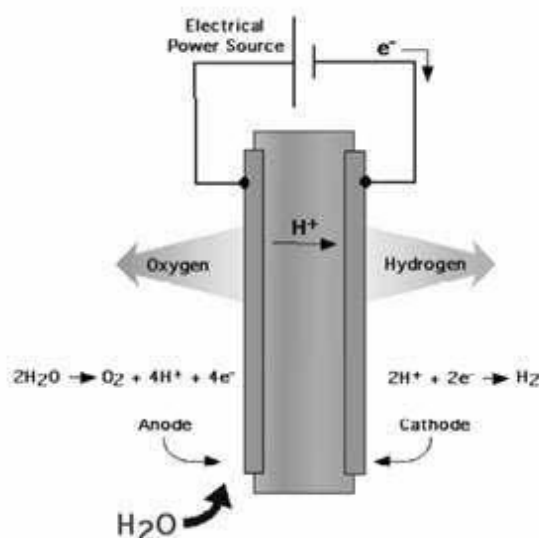
«Είναι προφανές ότι η γενικευμένη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο προϋποθέτει την προέλευση του υδρογόνου από μία μέθοδο η οποία είναι αποδοτική, από μία πηγή ιδανικά ανεξάντλητη, ιδανικά προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές και από μία αντίδραση η οποία δεν απελευθερώνει ρυπογόνες ουσίες στην ατμόσφαιρα (όπως μονοξείδιο ή διοξείδιο του άνθρακα).»

Έχοντας υπόψη το παραπάνω σκεπτικό, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σταδιακά μια σταδιακή αύξηση του παγκόσμιου ενδιαφέροντος για την παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, κυρίως εξαιτίας της σύγχρονης δυνατότητας κατασκευής ολοκληρωμένων συστημάτων από ηλεκτρολυτικές διατάξεις νερού, οι οποίες λειτουργούν μέσω της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με τη βοήθεια διαφόρων ΑΠΕ (κυρίως της ηλιακής και αιολικής ενέργειας). Τα ολοκληρωμένα αυτά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διαφόρων ΑΠΕ παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα παραδοσιακά ηλεκτρολυτικά συστήματα, ότι η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιούν παράγεται χωρίς κάποιο σημαντικό κόστος, μιας και βασίζεται όπως είπαμε στην παραγωγή της από διάφορες ΑΠΕ, ενώ ταυτόχρονα δεν εκλύονται ρυπογόνες ουσίες στην ατμόσφαιρα κατά την παραγωγή υδρογόνου.

Υπάρχει μία και μοναδική μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και αυτή είναι από το νερό. Ως γνωστόν, το νερό κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης διασπάται στα δύο στοιχεία που το αποτελούν, δηλαδή το υδρογόνο και το οξυγόνο. Η ηλεκτρόλυση του νερού,

προς παραγωγή υδρογόνου, πραγματοποιείται μέσα σε ειδικές διατάξεις που ονομάζονται διατάξεις ηλεκτρόλυσης και απαιτεί την ταυτόχρονη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Το βασικό πλεονέκτημα που προκύπτει κατά την ηλεκτρόλυση του νερού προς παραγωγή υδρογόνου, είναι ότι το υδρογόνο που παράγεται χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλές τιμές καθαρότητας και επομένως δύναται να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Η ηλεκτρόλυση του νερού, για την παραγωγή υδρογόνου, μέσω της χρησιμοποίησης του ηλεκτρικού ρεύματος που προέρχονταν από το κλασσικό δίκτυο ηλεκτρισμού, σαν μέθοδος, βρήκε ευρεία απήχηση από τις αρχές του 1900 μέχρι και τη δεκαετία του 1950 περίπου. Μετά τη δεκαετία του '50 όμως, λόγω των διαφόρων φθηνότερων μεθόδων που ανακαλύφθηκαν για την παραγωγή του υδρογόνου (κυρίως της καταλυτική αναμόρφωση φυσικού αερίου), η ηλεκτρόλυση του νερού εγκαταλείφθηκε στο μεγαλύτερο μέρος της, με αποτέλεσμα στις μέρες μας, μόνο ένα σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα να παράγεται πλέον με αυτόν τον τρόπο. Η εφαρμογή της ηλεκτρόλυσης του νερού προς παραγωγή του υδρογόνου εφαρμόζεται σήμερα κυρίως όταν υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις σε καθαρό υδρογόνο και οι ποσότητες αυτού που απαιτούνται δεν είναι πολύ μεγάλες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η εφαρμογή τους για την μαζική παραγωγή του υδρογόνου να γίνεται πολύ φθηνότερα από την κλασσική μέθοδο παραγωγής του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης (παραγωγή με χρησιμοποίηση της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου) και να εφαρμόζεται σταδιακά όλο και περισσότερο. Από την άλλη μεριά βέβαια, το κόστος κυρίως των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών συστημάτων παραγωγής υδρογόνου μέσω ΑΠΕ, είναι προς το παρόν ακόμα αρκετά υψηλό ώστε η παραγωγή αυτού μέσω των συγκεκριμένων διατάξεων να μπορεί να υποσκελίζει τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής του μέσω π.χ. των ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα η παραγωγή υδρογόνου μέσω ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών διατάξεων να μην χρησιμοποιείται τόσο μαζικά όσο αυτές. Στην Εικόνα 15 φαίνεται επίσης και η διαδικασία της εσωτερικής λειτουργίας, κατά την παραγωγή του υδρογόνου μέσω αυτής.

Φαίνεται λοιπόν ιδανική λύση, η παρασκευή του υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση υδατικών διαλυμάτων, ακόμα και του θαλασσινού νερού, με την αναγκαία ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές. Έτσι λύνεται το πρόβλημα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και από την άλλη το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας είναι θετικό αφού η κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή καυσίμου (υδρογόνου) είναι ουσιαστικά μηδενική.



Σχήμα 15: Αναπαράσταση εσωτερικής λειτουργίας συσκευής ηλεκτρόλυσης..

3.2.2. Αποθήκευση - Μεταφορά – Διανομή Υδρογόνου

Λόγω της εξαιρετικά χαμηλής πυκνότητάς του το υδρογόνο, κατά την αποθήκευσή του ως ασυμπίεστο ρευστό καταλαμβάνει εξαιρετικά μεγάλο όγκο. Αυτός είναι ο ανασταλτικός παράγοντας για την ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου. Για παράδειγμα, 1kg υδρογόνου σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας καταλαμβάνει όγκο 11m³. Συνεπώς, για τη χρήση του ως καύσιμο πρέπει να αυξηθεί με κάποιο τρόπο η πυκνότητά του, ώστε η δεξαμενή να καταλαμβάνει λογικές διαστάσεις. Έτσι το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί με τους εξής τρόπους:

- με τη μορφή συμπιεσμένου αερίου σε εξαιρετικά υψηλές πιέσεις
- ως κρυογονικό υγρό σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες
- με τη μορφή μεταλλικού υβριδίου όπου το αέριο υδρογόνο σχηματίζει χημικές ενώσεις με συγκεκριμένα μέταλλα ή μεταλλικά κράματα
- ως αέριο υδρογόνου προσροφημένο από κάποιο στερεό όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes).

Η λύση που χρησιμοποιείται ευρέως είναι αυτή της αποθήκευσης του υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο ενώ η πλέον υποσχόμενη είναι αυτή της αποθήκευσης του σε υδρίδια μετάλλων. Από την άλλη μεριά, η τεχνολογία των νανοσωλήνων άνθρακα, αν και πολλά υποσχόμενη είναι ακόμα καινούρια και αμφιλεγόμενη.

Η μεταφορά του υδρογόνου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω φορτηγών που μεταφέρουν υγροποιημένο υδρογόνο ή συμπιεσμένο σε αέρια φάση και μέσω αγωγών. Για τη διείσδυση του υδρογόνου στην αγορά, τουλάχιστον στην αρχική φάση διαμόρφωσης της και κατόπιν σε

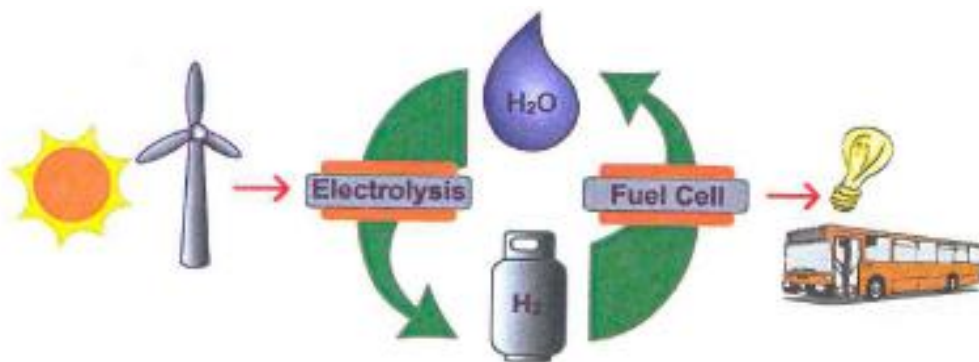
συγκεκριμένες εφαρμογές, τα φορτηγά είναι η πιο ενδεδειγμένη λύση. Το μειονέκτημα του συμπιεσμένου υδρογόνου, έναντι του υγροποιημένου, είναι η μεταφορά συγκριτικά λιγότερης ποσότητας ενέργειας.

Μελλοντικά προβλέπεται, ότι πολλές μεγάλες μονάδες παραγωγής του υδρογόνου ικανές να παράγουν μεγάλες ποσότητες αυτού, θα βρίσκονται συνδεδεμένες μεταξύ τους μέσω κατάλληλων αγωγών μεταφοράς του, οι οποίοι θα το μεταφέρουν σε αέρια μορφή. Μέρος του δικτύου αυτού θα αποτελούν και τα διάφορα κέντρα ελέγχου διανομής του υδρογόνου, τα οποία θα αναλαμβάνουν να το τροφοδοτούν σε μικρότερους σταθμούς διανομής του (π.χ. σε πρατήρια ανεφοδιασμού οχημάτων του, ηλεκτρικά εργοστάσια κ.τ.λ.). Επειδή η παραγωγή, κατά τη συγκεκριμένη προσέγγιση συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου, λαμβάνει χώρα μακριά από τις τοπικές πηγές κατανάλωσής του, ο συγκεκριμένος τρόπος διανομής του χαρακτηρίζεται σαν κεντροποιημένος.

Ένα βήμα παραπέρα, αποτελεί επίσης η απευθείας παραγωγή του υδρογόνου στο κάθε σημείο της ζήτησής του, όπου αυτό προφανώς κρίνεται δυνατό, χωρίς την απαραίτητη μεσολάβηση οποιονδήποτε ενδιάμεσων σταθμών παραγωγής του. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε για παράδειγμα να συμβεί με την παραγωγή του υδρογόνου από τον ίδιο τον χρήστη του, δηλαδή της ενέργειάς του, π.χ. στο χώρο του σπιτιού μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού από οικιακά ηλιακά ή αιολικά ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα με σκοπό την κάλυψη των διαφόρων οικιακών αναγκών ή στο χώρο της εργασίας για μικρές ή μεσαίες επιχειρήσεις.

Τα 3 στάδια λειτουργίας του **αποκεντρωμένου συστήματος διανομής** του υδρογόνου είναι τα εξής :

- Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την παραγωγή του υδρογόνου μέσω κατάλληλων τεχνικών, πιθανόν εφαρμόζοντας τις διάφορες τεχνολογίες ΑΠΕ.
- Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την αποθήκευση του παραχθέντος υδρογόνου με φυσικές ή χημικές διαδικασίες.
- Τέλος το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει τη μετατροπή της εσωτερικής χημικής ενέργειας του υδρογόνου αρχικά σε ηλεκτρισμό ή θερμότητα και στη συνέχεια σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.



Σχήμα 16: Στάδια λειτουργίας του αποκεντρωμένου συστήματος διανομής του υδρογόνου [30]

Από την παραπάνω ανάλυση της πιθανούς συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι το σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει η αποκεντρωμένη διανομή του είναι η σημαντική ενεργειακή ανεξαρτησία που αυτή προσφέρει σε σχέση με την κεντροποιημένη του διανομή. Αυτό γιατί, η δυσλειτουργία που ενδεχομένως θα μπορούσε αυτή να παρουσιάσει σε κάποιο σημείο του δικτύου της, δε θα είχε οπωσδήποτε σαν συνέπεια την παρεμπόδιση ή διακοπή της λειτουργίας και κάποιων άλλων σημείων του δικτύου της, μιας και, όπως αναφέραμε, τα διάφορα σημεία του ευρύτερου δικτύου της λειτουργούν σχεδόν ανεξάρτητα μεταξύ τους.

3.2.3. Βασικοί τύποι κυψελών καυσίμου

Πολυάριθμοι τύποι κυψελών καυσίμου έχουν κατασκευαστεί σήμερα, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για πολλές και διαφορετικές εφαρμογές. Τα ονόματα των κυψελών προσδιορίζουν το είδος του μεταφερόμενου ιόντος που διέρχεται από τον ηλεκτρολύτη. Η βασική δομή των κυψελών αυτών είναι όμοια, διαφοροποιούνται όμως ως προς το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, τη θερμοκρασία λειτουργίας, τους καταλύτες, την καθαρότητα των αντιδρώντων και τις επιμέρους χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται. Οι κύριοι τύποι κυψελών καυσίμου είναι:

- κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
- κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)
- κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (AFC)
- κυψέλες καυσίμου ανθρακικών αλάτων (MCFC)
- κυψέλες καυσίμου στερεοποιημένων οξειδίων (SOFC)
- κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

Για την εμπορική χρήση σε επίπεδο χαμηλής θερμοκρασιακής λειτουργίας έχει προταθεί η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), ενώ σε υψηλή θερμοκρασιακή

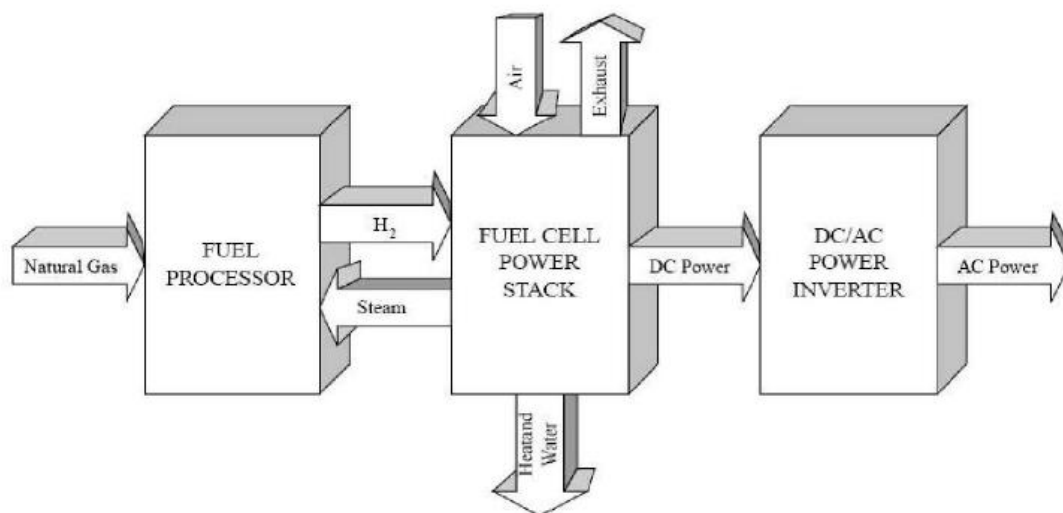
λειτουργία η κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) και στερεών οξειδίων (SOFC).

3.2.4. Χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου τύπου PEM και περιφερειακά συστήματα

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκτός από την κυψέλη καυσίμου ή την συστοιχία κυψελών καυσίμου περιλαμβάνει και περιφερειακό εξοπλισμό. Η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου, κυρίως υδρογόνου, σε συνεχές ρεύμα. Επομένως για να αξιοποιηθεί από το δίκτυο είναι απαραίτητη η χρήση ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Συνήθως χρησιμοποιείται αρχικά ένας μετατροπέας ανύψωσης DC/DC για να αυξήσει και να σταθεροποιήσει την τάση και στη συνέχεια ένας αντιστροφέας DC/AC (inverter) για να τη μετατρέψει σε εναλλασσόμενη με την επιθυμητή συχνότητα. Στην περίπτωση που το καύσιμο δεν είναι καθαρό υδρογόνο (όπως π.χ. το φυσικό αέριο ή μεθανόλη) είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί επεξεργασία του καυσίμου ώστε το τελικό αέριο που θα εισαχθεί στην κυψέλη να έχει υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η Μονάδα επεξεργασίας καυσίμου (αναμορφωτής - Reformer).

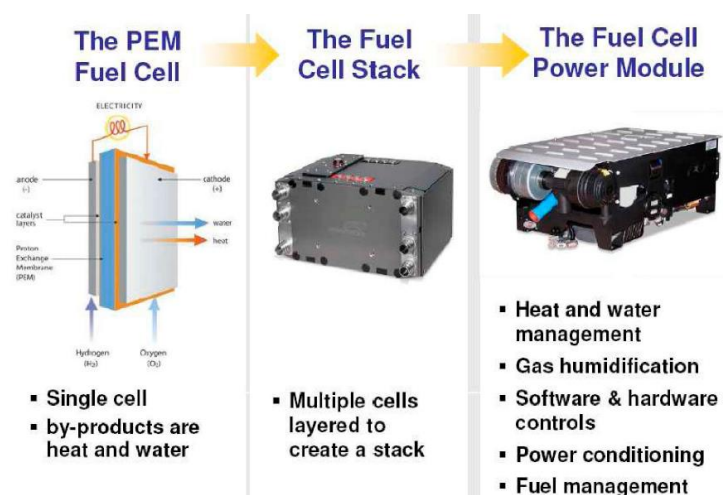
Όταν το σύστημα βρίσκεται σε κανονική λειτουργία υπάρχουν μεταβολές στο απαιτούμενο φορτίο στις οποίες πρέπει να προσαρμόζεται. Η απόδοση του συστήματος εκφράζεται από την χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος. Επομένως για να είναι βέλτιστη η απόδοση, η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος πρέπει να παραμένει σε συγκεκριμένο επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου κατάλληλων παραμέτρων όπως:

- Ο ρυθμός ροής των αντιδρώντων
- Η συνολική πίεση
- Οι μερικές πιέσεις των αντιδρώντων
- Η θερμοκρασία
- Η υγρασία της μεμβράνης.

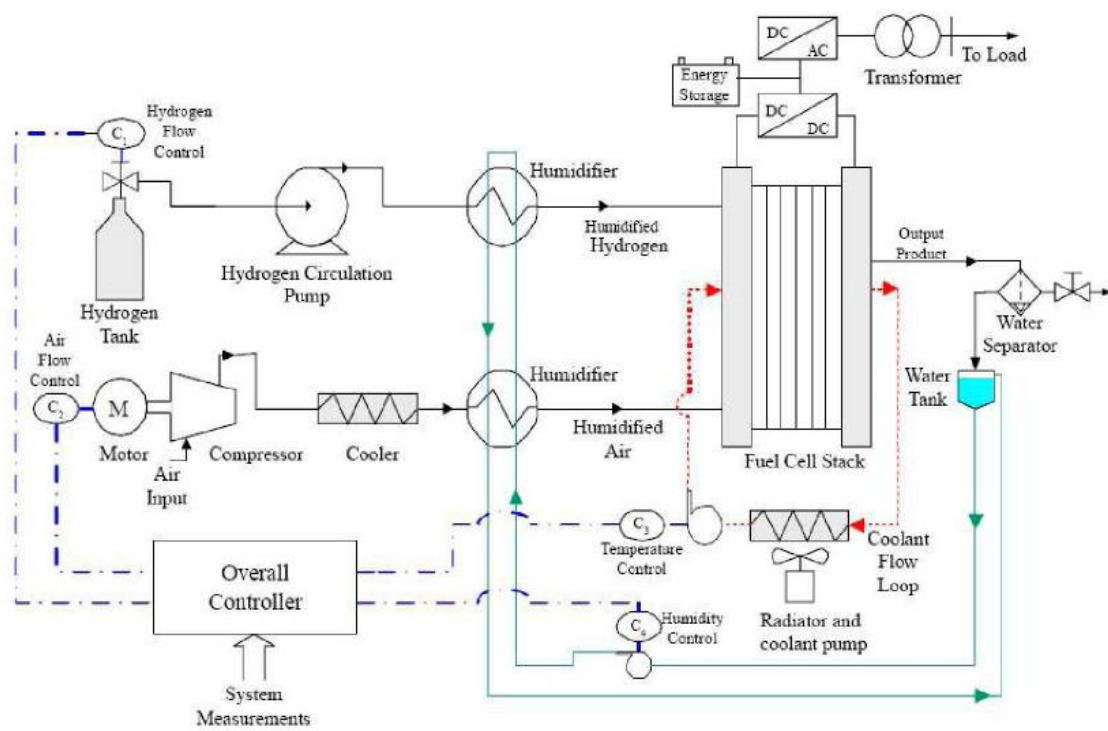


Σχήμα 17: Διασύνδεση Επεξεργαστή καυσίμου με Κυψέλη & Μετατροπέα Τάσης

Για τον έλεγχο των παραπάνω παραμέτρων χρησιμοποιούνται διάφορα βοηθητικά υποσυστήματα, όπως ανεμιστήρες για το υποσύστημα ψύξης, συμπιεστής οξυγόνου, αντλίες για την κυκλοφορία του υδρογόνου και την ψύξη της κυψέλης και υγραντήρες για τα αντιδρώντα. Επιπλέον χρησιμοποιείται εξοπλισμός που σχετίζεται με την μετατροπή ισχύος και τον έλεγχο του συστήματος, όπως ο μετατροπέας ανύψωσης και ο αντιστροφέας, ο κεντρικός ελεγκτής του συστήματος. Το πλήθος του βοηθητικού εξοπλισμού και ο τύπος του διαφέρει από μονάδα σε μονάδα, ανάλογά με την εφαρμογή. Οι παραπάνω παράμετροι πρέπει να ελέγχονται για να διασφαλίζεται η γρήγορη μεταβατική απόκριση του συστήματος, να γίνεται με σταθερό τρόπο η έναρξη λειτουργίας και να μπορεί το σύστημα να σταματήσει την λειτουργία με εξίσου σταθερό τρόπο.



Σχήμα 18: Από το μονό κελί καυσίμου στο ολοκληρωμένο σύστημα



Σχήμα 19: Ολοκληρωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου

4. Έλεγχος ευστάθειας μικροδικτύου – διαφορές από το συμβατικό δίκτυο

Στο συμβατικό ηλεκτρικό δίκτυο η συχνότητα του ρεύματος εξαρτάται άμεσα από την ενεργή ισχύ των μεγάλων, κεντρικών, στρεφόμενων μηχανών – γεννητριών που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και η τάση από την άεργη ισχύ που παράγεται από αυτές και από τις γραμμές μεταφοράς. Υπάρχει δηλαδή σχέση P/f και Q/V . Τρεις βασικές αλλαγές που θα συμβούν ή έχουν εν μέρει ήδη συντελεστεί θα αλλάξουν τις παραπάνω συσχετίσεις:

α) Η αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η παρουσία στρεφόμενων μηχανών με αδράνεια, καθώς οι περισσότερες από αυτές συνδέονται με το δίκτυο με ηλεκτρονικά ισχύος,

β) Δημιουργούνται τοπικά μικροδίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να λειτουργήσουν απομονωμένα, ως αποτέλεσμα της διασποράς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της εμφάνισης μονάδων αποθήκευσης. Τα δίκτυα αυτά έχουν γραμμές με ωμικό χαρακτήρα, αφού είναι τοπικά, μικρής εμβέλειας δίκτυα. Δηλαδή οι γραμμές τους δεν παράγουν άεργο ισχύ.

γ) Η διακύμανση φορτίου μέσα σε κάθε μικροδίκτυο είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με το μέγιστο φορτίο του, καθιστώντας τα μικροδίκτυα μη-σθεναρά.

Οι τρεις αυτές αλλαγές θα έχουν ως αποτέλεσμα στο μελλοντικό δίκτυο να υπάρχει και σχέση μεταξύ ενεργής ισχύος και τάσης (P/V) και μεταξύ άεργης ισχύος και συχνότητας (Q/f). Ο τρόπος που τα μεγέθη αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους εξαρτάται από το λόγο R/X του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτός ο λόγος εξαρτάται από τις διαστάσεις του δικτύου και παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση μεταξύ του δικτύου διανομής και του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, ο έλεγχος τάσης και συχνότητας που προτείνεται αναλύεται σε τρία επίπεδα. Στο πρωτογενές ή πρωτοβάθμιο επίπεδο, στο οποίο τα επίπεδα τάσης του δικτύου καθορίζουν άμεσα και τοπικά χωρίς επικοινωνία αλλαγές στην κατανάλωση ή την παραγωγή ενεργού ισχύος. Στο δευτερογενές επίπεδο όπου υπάρχει ανάγκη για την ύπαρξη μέτρησης και επικοινωνίας μεταξύ πηγών, μονάδων αποθήκευσης και καταναλωτών και στο τριτογενές ή τριτοβάθμιο επίπεδο όπου οι αλλαγές στη ζήτηση ή την παραγωγή ενέργειας καθορίζονται από οικονομικά μεγέθη.

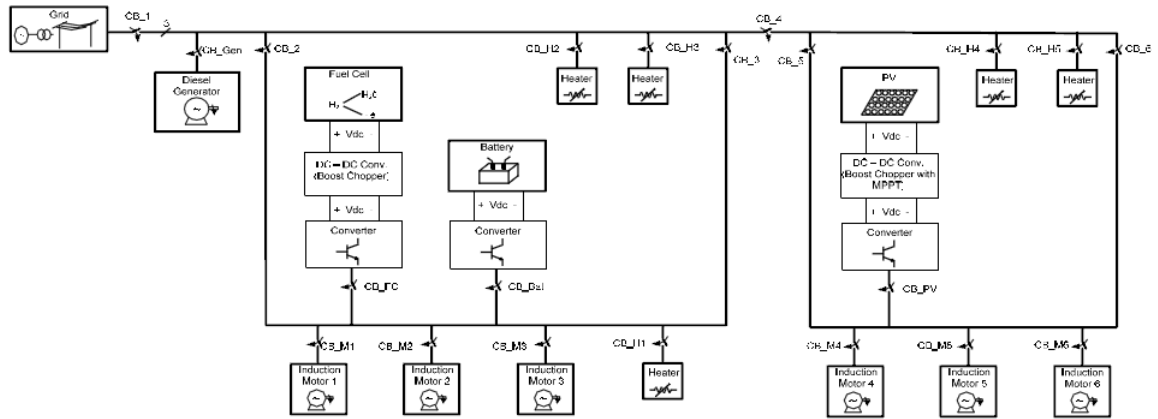
Ως εκ τούτου, ακολουθούν τα ακόλουθα μέρη: Αρχικά εξηγείται ο τρόπος ρύθμισης τάσης και συχνότητας στο συμβατικό ηλεκτρικό δίκτυο, οι αιτίες που καθιστούν αυτή τη μέθοδο αναποτελεσματική στο έξυπνο δίκτυο και η παραλλαγή αυτής της μεθόδου για εφαρμογή στο έξυπνο δίκτυο. Στη συνέχεια περιγράφεται ο πρωτοβάθμιος, δευτεροβάθμιος και τριτοβάθμιος έλεγχος σε ένα μικροδίκτυο.

4.1 Ρύθμισης τάσης και συχνότητας στο συμβατικό δίκτυο, αιτίες αναποτελεσματικότητας στο έξυπνο δίκτυο και παραλλαγή για εφαρμογή στο έξυπνο δίκτυο

Η υψηλή διεύθυνση των μονάδων ΔΠ δημιουργεί πάντα την ανησυχία της σταθερότητας του συστήματος. Είναι πάντα επιθυμητό σε ένα μικροδίκτυο όλες οι μονάδες ΔΠ να ανταποκρίνονται σε κάθε αλλαγή φορτίου με παρόμοιο ρυθμό για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του συστήματος και ειδικά των μονάδων βάσης. Με την παρουσία μαζί και των αδρανειακών (σύγχρονη γεννήτρια) και μη αδρανειακών πηγών (inverters), ο χρόνος απόκρισης για κάθε μονάδα σε οποιαδήποτε αλλαγή της ζήτησης φορτίου θα είναι διαφορετικός. Ένας μετατροπέας (Inverter), μπορεί να ελέγξει την τάση εξόδου του ακαριαία και έτσι η αλλαγή στη ζήτηση ενέργειας μπορεί να γίνει γρήγορα, ενώ σε μια μονάδα με σύγχρονη γεννήτρια (βιοαέριο ή ντιζελογεννήτρια)-αδρανειακή πηγή, ο ρυθμός μεταβολής της παραγωγής ενέργειας περιορίζεται από την αδράνεια της μηχανής. Για να διασφαλιστεί ότι η αλλαγή του φορτίου μπορεί να διαβαστεί από όλες τις μονάδες στο ίδιο ρυθμό, ο ρυθμός αλλαγής της ισχύος εξόδου των μετατροπέων πρέπει να περιορίζεται. Επιπλέον, όταν οι μονάδες ΔΠ και τα φορτία δεν είναι συμμετρικά κατανομημένα κατά μήκος του μικροδικτύου, υψηλή αντίσταση της γραμμής μπορεί να είναι μια μεγάλη πρόκληση για τον έλεγχο καταμερισμού της ενέργειας. Με τον συντονισμένο έλεγχο των μονάδων ΔΠ, η σταθερότητα του συστήματος είναι ενισχυμένη και εξασφαλίζεται με την τροποποίηση της μεθόδου droop control [39].

4.1.1. Περιγραφή ενός τυπικού μικροδικτύου

Το σύστημα του μικροδικτύου που είναι υπό εξέταση φαίνεται στο Σχήμα 20. Υπάρχουν τέσσερις μονάδες ΔΠ, όπως φαίνεται: μια από αυτές είναι μια αδρανειακή πηγή (ντίζελ - γεννήτρια), ενώ οι άλλες είναι πηγές μετατροπέων (η ΦΒ, κυψέλες καυσίμου και μπαταρία). Υπάρχουν 5 ωμικά φορτία και 6 επαγωγικοί κινητήρες.



Σχήμα 20: Δομή του συστήματος υπό εξέταση [40].

4.1.2. Μέθοδος ελέγχου πτώσης (droop control)

Η αποκεντρωμένη κατανομή της ενέργειας μεταξύ των μονάδων ΔΠ επιτυγχάνεται με τη χρήση του συμβατικού ελέγχου πτώσης, που ορίζεται από τις σχέσεις:

$$\omega = \omega_s - m(P - P_{\text{rated}})$$

$$V = V^* - n(Q - Q_{\text{rated}})$$

όπου m και n είναι οι συντελεστές πτώσης, ω_s είναι η σύγχρονη συχνότητα, ω η συχνότητα του δικτύου (rad/sec). V είναι η τάση του δικτύου και V^* είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας του δικτύου.

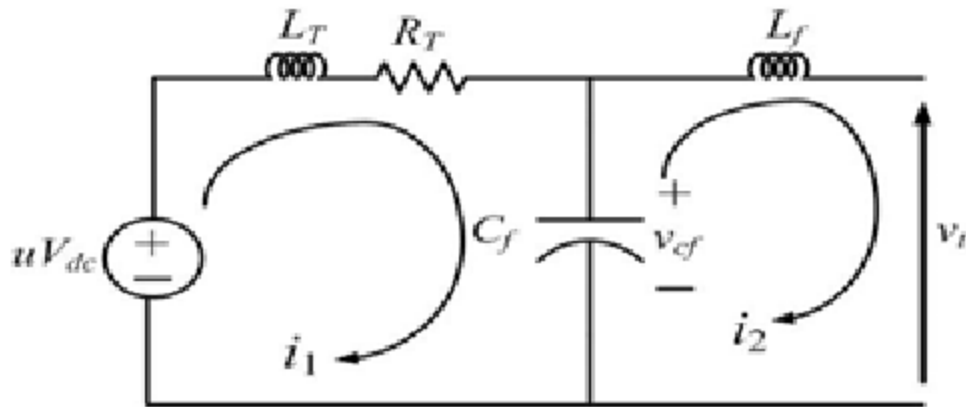
Για να αυξηθεί η απόκριση του συστήματος και να περιοριστεί το ποσοστό της μεταβολής της ισχύος σε μη αδρανειακές μονάδες ΔΠ, οι εξισώσεις ελέγχου πτώσης τροποποιούνται ως εξής:

$$\omega = \omega_s - m(P_{\text{rated}} - P) + m_d \cdot dP/dt$$

$$V = V^* - n(Q_{\text{rated}} - Q) + n_d \cdot dQ/dt$$

4.1.3. Η μοντελοποίηση του Inverter

Οι μη αδρανειακές πηγές, όπως ΦΒ, η κυψέλη καυσίμου και η μπαταρία είναι διασυνδεδεμένες στο μικροδίκτυο μέσω των μετατροπέων ελέγχου τάσης (VSCs), όπως φαίνεται στο Σχήμα 21.



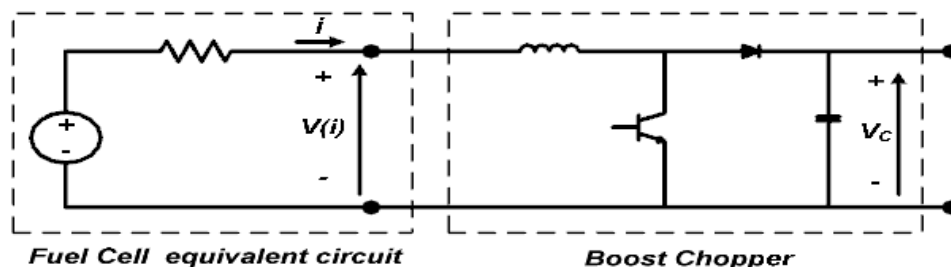
Σχήμα 21: Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα για την προσομοίωση [40].

4.1.4. Τα μοντέλα των μονάδων ΔΠ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχουν 4 πηγές στο μικροδίκτυο. Η σύγχρονη γεννήτρια έχει γνωστό ισοδύναμο κύκλωμα. Τα άλλα τρία μοντέλα των πηγών αναλύονται παρακάτω.

Α. Κυψέλη καυσίμου

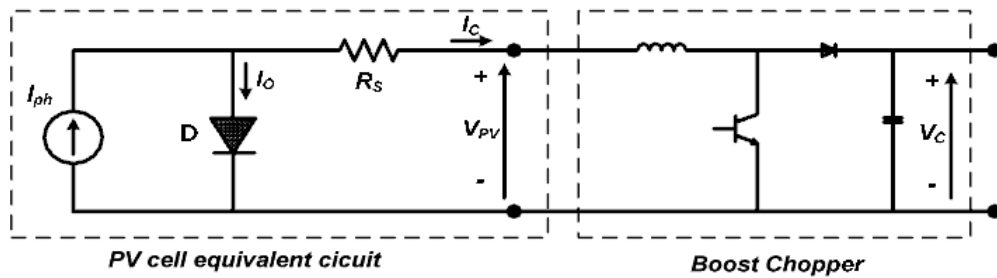
Έχουν εισαχθεί διαφορετικές μέθοδοι για τη μοντελοποίηση των κυψελών καυσίμου, ωστόσο χρησιμοποιείται εδώ ένα απλοποιημένο εμπειρικό μοντέλο.



Σχήμα 22: Κύκλωμα κυψέλης καυσίμου [40].

Β. Φωτοβολταϊκή Κυψέλη (ΦΒ)

Οι συστοιχίες των φωτοβολταϊκών χτίζονται με τον συνδυασμό των φωτοβολταϊκών κυττάρων σε σειρά και παράλληλα και συνήθως αντικατοπτρίζονται με ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 23: Κύκλωμα ΦΒ [40].

Γ. Μπαταρία

Η μπαταρία μοντελοποιείται ως μια πηγή σταθερής dc τάσης σε σειρά με εσωτερική αντίσταση όπου ο VSC είναι συνδεδεμένος με την έξοδο της. Η μπαταρία έχει έναν περιορισμό τη διάρκεια της παραγόμενης ενέργειας και εξαρτάται από την ποσότητα του ρεύματος που παρέχεται από αυτή.

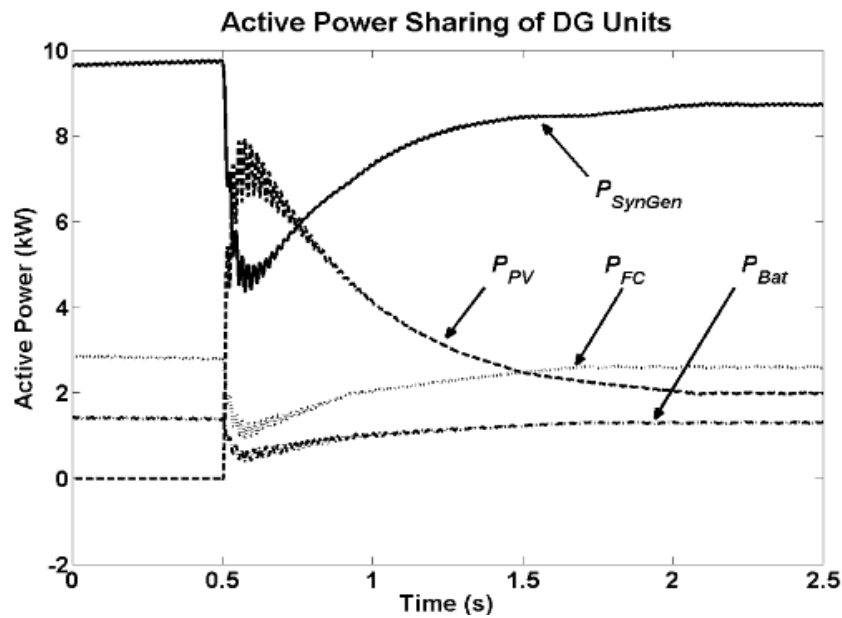
4.1.5. Μελέτες προσομοίωσης

Το σύστημα προσομοιώνεται σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας και με διαφορετική ζήτηση φορτίου του μικροδικτύου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται πιο κάτω [40]:

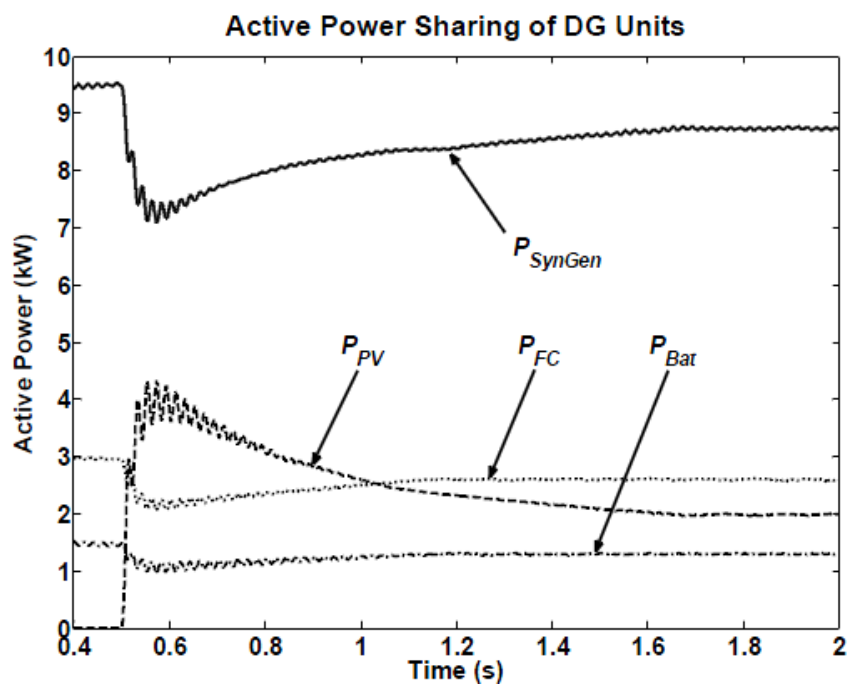
Όπως αναφέρθηκε πριν, είναι πάντα επιθυμητό ότι όλες οι μονάδες ΔΠ ανταποκρίνονται σε οποιαδήποτε μεταβολή του φορτίου με παρόμοιο ρυθμό για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση μιας πηγής. Η αδράνεια της γεννήτριας ντίζελ και ταχύτητα απόκρισης του ΦΒ έχουν σαν αποτέλεσμα μια μεγάλη υπερφόρτωση της Φ/Β μονάδας (Σχήμα 24) πέρα των ονομαστικών της στοιχείων, κάτι που στην πραγματικότητα δεν είναι δυνατόν, χωρίς έλεγχο του μετατροπέα.

Προκειμένου να περιοριστεί η ισχύς του PV, χρησιμοποιείται η προτεινόμενη τροποποίηση του μετατροπέα ώστε να περιορίζει την ισχύ εξόδου.

Η νέα απόκριση του συστήματος με την εφαρμογή της παραλλαγμένης μεθόδου droop control είναι πολύ πιο ρεαλιστική. Είναι προφανές έχει μειωθεί η υπέρβαση στην παραγόμενη ισχύ του PV.



Σχήμα 24: Λειτουργία χωρίς έλεγχο του μετατροπέα [40].



Σχήμα 25: Λειτουργία με έλεγχο του μετατροπέα [40].

4.2 Πρωτοβάθμιος, δευτεροβάθμιος και τριτοβάθμιος έλεγχος μικροδικτύου

Σε νησιδοποιημένες συνθήκες λειτουργίας, το μικροδίκτυο πρέπει να διατηρήσει την ισορροπία της ισχύος ανεξάρτητα από το κύριο δίκτυο. Λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του μικροδικτύου, όπως ο ωμικός χαρακτήρας των γραμμών, η ύπαρξη πολλών ηλεκτρονικών ισχύος διασύνδεσης των γεννητριών, η μεγάλη διακύμανση του φορτίου ως προς το ονομαστικό, μειώνεται η ευελιξία παροχής ισχύος, η αξιοπιστία και η ποιότητα ισχύος του συστήματος. Τα θέματα αυτά επιβάλλουν να καταστεί δυνατή η ρύθμιση της τάσης σε μικροδίκτυο λειτουργίας νήσου πολύ γρήγορα, χωρίς να είναι αναγκαία η επικοινωνία. Ο πρωτοβάθμιος αυτός έλεγχος ενεργοποιείται από το επίπεδο τάσης του μικροδικτύου και πρέπει να αλλάξει την παρεχόμενη ή καταναλισκόμενη ισχύ πολύ γρήγορα, ώστε να μην διατηρηθεί η τάση εκτός των επιτρεπτών ορίων. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο έλεγχος της τάσης έχει άμεση σχέση με την παράγωγή και τη ζήτηση, επιτρέποντας την αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος χωρίς επικοινωνία για τον πρωτογενή έλεγχο.

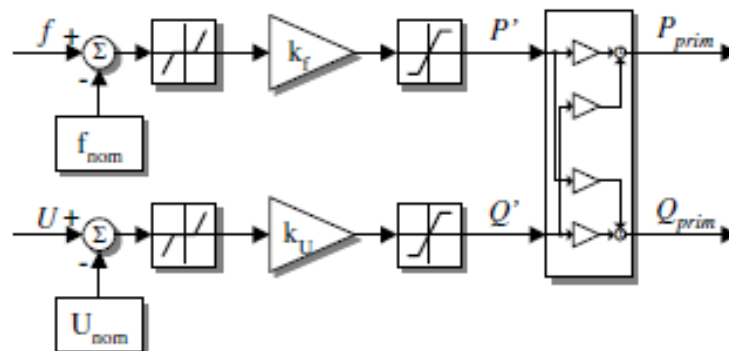
Ο δευτεροβάθμιος έλεγχος εξασφαλίζει ότι η απόκλιση συχνότητας και μέσης τάσης ρυθμίζονται προς το μηδέν μετά από κάθε αλλαγή φορτίου ή παραγωγής. Ο τριτογενής έλεγχος αποβλέπει στη βέλτιστη λειτουργία από οικονομική άποψη, και επιτυγχάνεται με τη διασφάλιση, όσο είναι τεχνικά δυνατόν, ότι όλες οι μονάδες θα εμφανίζουν ίσο οριακό κόστος (marginal cost).

4.2.1. Πρωτοβάθμιος έλεγχος: εξασφάλιση αξιόπιστης λειτουργίας, ακόμη και όταν η επικοινωνία έχει αποτύχει.

Ο κύριος σκοπός του πρωτογενούς ελέγχου είναι να εξασφαλίσει αξιόπιστη λειτουργία, όταν η επικοινωνία επίσης έχει αποτύχει.

Το πρωτοβάθμιο μπλοκ ελέγχου εφαρμόζει τα χαρακτηριστικά droop, που καθορίζονται από τις σταθερές k_f και K_U (Σχήμα 26). Οι έξοδοι είναι οι δράσεις P_{prim} Q_{prim} , σε σχέση με τις αποκλίσεις σε τάση και συχνότητα ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι τιμές της συχνότητας και της τάσης θα παραμείνουν κοντά στις απαιτούμενες τιμές.

Μια νεκρή ζώνη περιλαμβάνεται τόσο στη συχνότητα όσο και στην τάση ελέγχου για τη διασφάλιση ότι ο κύριος έλεγχος θα αρχίζει να λειτουργεί όταν η συχνότητα και η τάση υπερβούν κάποιο ελάχιστο επίπεδο.



Σχήμα 26: Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα του πρωτογενούς δομικού ελέγχου, ενσωματώνοντας νεκρές ζώνες και περιοριστές τόσο σε συχνότητα όσο και τον έλεγχο της τάσης. [14].

Όπως είπαμε παραπάνω, στην πράξη, επειδή το δίκτυο χαμηλής τάση έχει ωμικό χαρακτήρα και οι πηγές με μετατροπέα δεν εμφανίζουν την αδράνεια των στρεφόμενων μηχανών, η ενεργή ισχύς P_{prim} επηρεάζει την τάση U και η άεργη ισχύς Q_{prim} τη συχνότητα f . Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις παραδοσιακές πρακτικές στο δίκτυο διανομής, όπου P_{prim} συνδυάζεται με f και Q_{pri} με U .

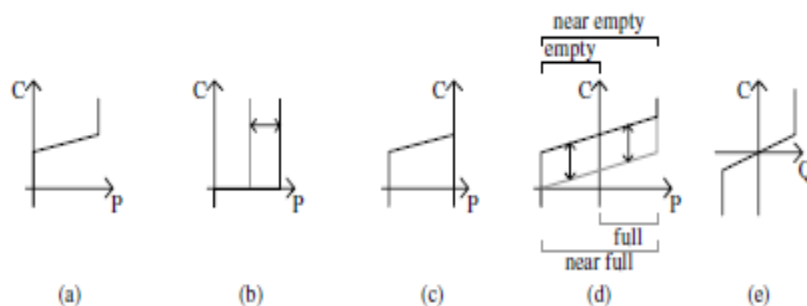
4.2.2. Δευτερεύον έλεγχος: βελτιστοποίηση της ποιότητας ισχύος

Ενώ οι αποκλίσεις συχνότητας είναι οι ίδιες σε όλες τις μονάδες ΔΠ (εκτός από τα σφάλματα στις μετρήσεις), οι αποκλίσεις στη τάση διαφέρουν ανάλογα με τα τοπικά φορτία, την παραγωγή και την αντίσταση των γραμμών. Ο σκοπός του δευτεροβάθμιου ελέγχου είναι να ελαχιστοποιεί το μέσο όρο όλων των αποκλίσεων τάσεων και συχνότητας, όπως μετράται από τις μονάδες ΔΠ. Μετά τον πρωταρχικό έλεγχο οι αποκλίσεις ενεργού και άεργου ισχύος P_{prim} και Q_{prim} περιορίζουν τις αλλαγές στην τάση και στη συχνότητα αμέσως μετά την σύνδεση φορτίου ή την παραγωγή. Στο δευτεροβάθμιο έλεγχο επιτυγχάνονται ελάχιστες αποκλίσεις τάσης και συχνότητας, διασφαλίζοντας ότι ο μέσος όρος των αποκλίσεων P_{prim} Q_{prim} όλων των μονάδων ΔΠ γίνεται μηδέν. Ως αποτέλεσμα, βελτιώνεται η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Οι ενέργειες αυτού του δευτερεύοντα ελέγχου P_{sec} Q_{sec} λαμβάνονται από τον υπολογισμό του μέσου όρου των πρωτογενών ενεργειών ελέγχου μέσω ενός αλγορίθμου.

4.2.3. Τριτοβάθμιος έλεγχος: οικονομική βελτιστοποίηση

Μετά τις δράσεις του πρωτογενούς ελέγχου, ο δευτερογενής έλεγχος αναλαμβάνει να βελτιώσει την ποιότητα του ηλεκτρικού ρεύματος. Ο τριτογενής έλεγχος με τη σειρά του αντικαθιστά το δευτερογενή ως προς τη βελτίωση της οικονομικής ισορροπίας της προσφοράς και της ζήτησης. Η ισχύς που έχει προγραμματιστεί από το δευτερεύον έλεγχο αναδιανέμεται μεταξύ

των μονάδων ΔΠ με τον καλύτερο οικονομικό τρόπο. Τα σημεία ρύθμισης της κάθε μονάδας ΔΠ, έχουν βάση σύγκρισης το οριακό κόστος λειτουργίας τους. Το βέλτιστο οικονομικό σημείο λειτουργίας είναι το σημείο στο οποίο το οριακό κόστος όλων των μονάδων ΔΠ είναι ίσο. Η αρχή είναι η ίδια όπως χρησιμοποιείται στις αγορές συναλλάγματος γιατί ότι συμβαίνει είναι σε πραγματικό χρόνο και χωρίς κεντρικό ελεγκτή. Εδώ είναι πλήρως καταναεμημένο χρησιμοποιώντας ένα gossip αλγόριθμο. Το Σχήμα 27 δείχνει το οριακό κόστος λειτουργίας ορισμένων βασικών μονάδων ΔΠ. Όλες οι καμπύλες αύξησης του κόστους με την ισχύ P είναι αναγκαίες για να βρεθεί ένα μοναδικό βέλτιστο οριακό κόστος:



Σχήμα 27: Οριακό κόστος λειτουργίας ορισμένων βασικών μονάδων ΔΠ: (α) ντιζελογεννήτριας, (β) Φ/Β, (γ) ευφυούς φορτίου, (δ), μονάδας αποθήκευσης, και (ε) άεργης ισχύος. [14].

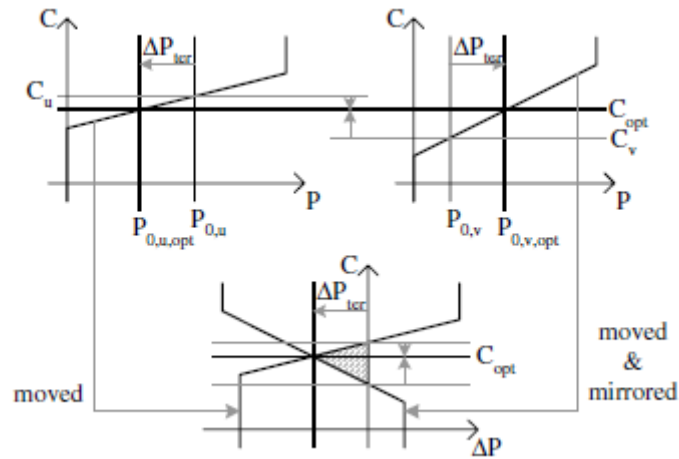
(α) Η απόδοση μειώνεται καθώς αυξάνεται το φορτίο, άρα αυξάνεται το κόστος,

(β) Φ/Β με πλήρη παραγωγική ικανότητα κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας και μέρος μόνο της πλήρους ικανότητας κατά τη διάρκεια άστατου καιρού,

(γ) ευφυές φορτίο, εκπροσωπείται ως γεννήτρια αρνητικής παραγωγής

(δ) μονάδα αποθήκευσης με διαφορετικά επίπεδα αποθήκευσης. Όταν αδειάζει η μονάδα αποθήκευσης, τόσο υψηλότερο είναι το κόστος στο οποίο χρειάζεται να επαναφορτιστεί, και ακόμη υψηλότερο το κόστος στο οποίο είναι πρόθυμη να παρέχει ισχύ στο δίκτυο,

(ε) Παραγωγή άεργης ισχύος είναι μια μονάδα ΔΠ παραγωγής άεργου ισχύος.



Σχήμα 28: Αντιστοίχιση συναρτήσεων οριακού κόστους δύο μονάδων ΔP . [14].

Η αρχή του τριτοβάθμιου ελέγχου με gossip αλγόριθμο είναι ότι περιοδικά κάθε μονάδα u ταιριάζει το οριακό κόστος της λειτουργίας της με ένα τυχαίο εταίρο V . Παράλληλα η μονάδα V ταιριάζει το οριακό κόστος της λειτουργίας της με την u μονάδα. Η αντιστοίχιση του κόστους επιτυγχάνεται με την αλλαγή δύο σημείων παραγωγής/ζήτησης και ρυθμίζεται έτσι ώστε να διατηρείται η ισορροπία, ενώ και οι δύο μονάδες λειτουργούν σε ίσο οριακό κόστος. Στο σχήμα 28 φαίνεται το ταίριασμα του οριακού κόστους δύο μονάδων.

5. Επικουρικές Υπηρεσίες Μονάδων Διανεμημένης Παραγωγής

5.1 Η έννοια της επικουρικής υπηρεσίας των μονάδων διανεμημένης παραγωγής

Ως επικουρική υπηρεσία μιας μονάδας ΔΠ-ΗΕ ορίζεται οποιαδήποτε υπηρεσία όπως γρήγορη αντιστάθμιση ενεργής και άεργης ισχύος, ρύθμιση τάσης και συχνότητας, εφεδρική παροχή ισχύος, όταν αυτές ζητηθούν από το σύστημα διαχείρισης του τοπικού δικτύου όπου είναι συνδεδεμένη η μονάδα. Είναι προφανές ότι τέτοιου είδους υπηρεσίες, στο υπάρχον δίκτυο παρέχουν:

Α) οι μεγάλες κεντρικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (μονάδες βάσης, όπως ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, σταθμοί φυσικού αερίου, πετρελαίου), με την προϋπόθεση να έχουν περιθώρια, δηλαδή να μην λειτουργούν στις ονομαστικές τους τιμές τη στιγμή που θα τους ζητηθεί η επικουρική υπηρεσία.

Β) Οι περισσότεροι ΥΗΣ, οι οποίοι συνήθως καλύπτουν τις αιχμές της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Και οι δύο έχουν αυτή τη δυνατότητα και μάλιστα με μεγάλη ταχύτητα ανταπόκρισης, γιατί αποτελούνται από σύγχρονες γεννήτριες. Από την άλλη, για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά πάρκα, με την υπάρχουσα υποδομή τους, δεν έχουν τέτοια δυνατότητα, καθώς οι ΜΡΡΤ που διαθέτουν τους αναγκάζουν να παρέχουν συνεχώς τη μέγιστη δυνατή ισχύ στο δίκτυο. Το ίδιο συμβαίνει και με τα αιολικά πάρκα, καθώς και με άλλες μονάδες ΔΠ, είτε λόγω τεχνικών προδιαγραφών, είτε λόγω των συμβολαίων που έχουν συνάψει με το διαχειριστή του δικτύου.

5.2 Αναγκαιότητα των συμβολαίων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που προσαρμόζονται στις επικουρικές υπηρεσίες των μονάδων

Είναι προφανές ότι στο σημερινό δίκτυο, οι διανεμημένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχουν καμία συμβολή σε επικουρικές υπηρεσίες του δικτύου, αλλά μάλλον δρουν παθητικά σε οποιαδήποτε κατάσταση διαταραχής της τάσης ή της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι όταν η τάση ή η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου ξεπεράσουν κάποια όρια, τόσο τα Φ/Β πάρκα, όσο και οι μικροί ιδιωτικοί ΥΗΣ, ακόμη και τα αιολικά πάρκα αποσυνδέονται από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Όμως, στο μελλοντικό ηλεκτρικό δίκτυο, ακόμη και στο σημερινό, κατά τόπους θα εμφανίζονται τέτοιου είδους διαταραχές τάσης, συχνότητας ή ισοζυγίου ισχύος, που δεν μπορούν να ελεγχθούν από τα σημερινά απομακρυσμένα κέντρα ελέγχου. Οπότε, σε περίπτωση που **απαιτηθεί νησιδοποιημένη λειτουργία** του τοπικού δικτύου, η παθητική τους συμπεριφορά δεν

συμβάλει καθόλου στην ευστάθεια του τοπικού δικτύου. Επίσης, σε πολλά σημεία του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου σήμερα στην Ελλάδα, **δεν επιτρέπεται η κατασκευή άλλων ΑΠΕ**, με βάση τα συμβόλαια που συνάπτονταν ως σήμερα με το διαχειριστή του δικτύου. Και αυτό γιατί τυχόν νέες μονάδες ΔΠ με συνεχή λειτουργία (μονάδες βάσης) θα επιβάρυναν αν όχι θα απέτρεπαν την ομαλή και αξιόπιστη παροχή ΗΕ στους καταναλωτές. Επιπλέον, **η τιμή της kWh που παρέχεται από τα Φ/Β πάρκα έχει μειωθεί ραγδαία**, λόγω της αντικειμενικής δυστοκίας του διαχειριστή να συνεχίσει να δίνει οικονομικό κίνητρο στους μελλοντικούς επενδυτές Φ/Β. Κάτι τέτοιο θα συμβεί αναπόφευκτα και με άλλες μονάδες ΔΠ-ΗΕ στο μέλλον.

Αυτό σημαίνει ότι πρέπει πλέον και οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής (υπάρχουσε και νέες) να εφοδιαστούν (α) με συστήματα παροχής επικουρικών υπηρεσιών και (β) με νέα συμβόλαια παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πρώτη προϋπόθεση σημαίνει ότι πρέπει να αλλάξουν οι τεχνικές προδιαγραφές που ισχύουν σήμερα για μερικές από τις υποδομές των μονάδων ΔΠ-ΗΕ. Για παράδειγμα, οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών πάρκων (PV-inverters) μέχρι σήμερα, δεν είχαν τη κατασκευαστική δυνατότητα να παρέχουν άεργη ισχύ στο δίκτυο, αλλά μόνο ενεργή ισχύ. Σήμερα, όμως, οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες έχουν ως σκοπό να επέμβουν μέσα στον αντιστροφέα, για να ελέγξουν την ενεργή και την άεργη ισχύ που παρέχει το Φ/Β πάρκο [31]-[38]. Πρέπει δηλαδή το Φ/Β πάρκο να έχει τη δυνατότητα μέρος της ενεργής ισχύος του να τη μετατρέψει σε άεργη, για να συμβάλλει στην επαναφορά της τάση ή της συχνότητας εντός των ορίων.

Η δεύτερη προϋπόθεση σημαίνει ότι για την κατασκευή νέων Φ/Β πάρκων ή άλλων μονάδων θα πρέπει να συναφθούν συμβόλαια που θα είναι προσανατολισμένα στην αμοιβή των ιδιοκτητών αυτών των μονάδων όχι με βάση την ποσότητα της παρεχόμενης ενέργειας, αλλά τη συμβολή της μονάδας στην ομαλή λειτουργία του δικτύου και τη διατήρηση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος. Για παράδειγμα, θα πρέπει να θεσπιστούν ειδικές αυξημένες χρεώσεις για την ενέργεια-ισχύ που είναι δυνατόν να παρέχει ή **να απορροφήσει** μία μονάδα κατά τη διάρκεια νησιδοποίησης του τοπικού δικτύου ή κατά τη διάρκεια βελτίωσης του επιπέδου της τάσης ή της συχνότητας του δικτύου.

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι η επιτυχημένη εφαρμογή τέτοιων επικουρικών υπηρεσιών εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ ενεργού και άεργης ισχύος (P , Q) με την τάση και συχνότητα του δικτύου (V , f). Ο τρόπος που τα μεγέθη αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους εξαρτάται από το λόγο R/X του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτός ο λόγος εξαρτάται από τις διαστάσεις του δικτύου και παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση μεταξύ του δικτύου διανομής και του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

6. Διαδικασία αδειοδότησης μονάδων διανεμημένης παραγωγής από το ΔΕΔΔΗΕ – τεχνικά κριτήρια

Προσομοίωση ροής φορτίου- προγράμματα -software.

7. Αναφορές

- [1] E. Santacana, G. Rackliffe, L. Tang, X. Feng, "Getting Smart-With a Clearer Vision of the Intelligent Grid, Control Emerges from Chaos," *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 8, Nr. 2, pp. 41-48, 2010.
- [2] J. Fan, S. Borlase, "The evolution of distribution," *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 7, Nr. 2, pp. 63 - 68, 2009.
- [3] Marwam M. Mahmoud, On the storage batteries used in solar electric powersystems and development of an algorithm for determining their ampere-hour capacity, *Electric Power Systems Research*, vol. 71, pp. 85-89, 2004 (available online at www.sciencedirect.com).
- [4] Sabine Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen, Methods for state-of-charge determination and their applications, *Journal of Power Sources*, vol. 96, pp 113-120, 2001 (available online at www.elsevier.com).
- [5] D. Stimoniari, D. Tsiamitros, T. Kottas, N. Asimopoulos, E. Dialynas, "Smart Grid Simulation Using Small-Scale Pilot Installations-Experimental Investigation of a Centrally-Controlled Microgrid," *IEEE PowerTech'11 Conference*, Trondheim, Norway, 2011, available at <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [6] D. Stimoniari, D. Tsiamitros, N. Poulakis, T. Kottas, V. Kikis, E. Dialynas, "Investigation of Smart Grid Topologies Using Pilot Installations-Experimental Results," *2011 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference (IEEE-ISGT-2011)*, Manchester, UK, 2011. available at <http://ieeexplore.ieee.org>
- [7] MICROGRIDS – Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids', EU Contract ENK5-CT-2002-00610, Technical Annex, May 2002, also available at <http://microgrids.power.ece.ntua.gr>
- [8] Σορτικός Α., «Αναπτύσσοντας τα έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα», Πτυχιακή εργασία, ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, τμ. Ηλεκτρολογίας, 2011.
- [9] H. Laaksonen, K. Kauhaniemi, S. Voima, "Microgrid Voltage Level Management and Role as Part of Smart Grid Voltage Control," *IEEE PowerTech'11 Conference*, Trondheim, Norway, 2011, available at <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [10] D. Coll-Mayor, A. Notholt, A. Engler, E. Garcia-Moreno, "Using Minigrids for stabilizing the Main Grid," presented at the CIGRE Conference, Paris, France, 2006.
- [11] G. K. Papagiannis, Papadopoulos T. A., C. D. Dovas, D. A. Tsiamitros, P. S. Dokopoulos, "A PLC-Based Energy Consumption Management System. PowerLine Performance Analysis: Field Tests and Simulation Results", *IEEE PowerTech'05 (St. Petersburg, Russia)*, 2005.
- [12] Δ. Στημονιάρης, Δ. Τσιαμήτρος, Ν. Πουλάκης, Θ. Κώπτας, Α. Πασχόπουλος, Ε. Διαλυνάς, «Πειραματική Διερεύνηση Τοπολογιών Έξυπνων Ηλεκτρικών Δικτύων με Αυξημένη Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας», e-Επιστήμη, Σύλλογος Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων Βορείου Ελλάδος, Τεύχος 1, 2011.
- [13] A. Nourai and D. Kearns "Batteries included", *IEEE Power Energy*, vol. 8, no. 2, pp.49 - 54 , 2010.
- [14] De Brabandere K., Vanthournout K., Driesen J., Deconinck G., Belmans R., "Control of Microgrids", *IEEE PES General Meeting 2007*, Tampa, FL, pp: 1-7, 2007.
- [15] Majumder Ritwik, Shahnia Farhad, Ghosh Arindam, Ledwich Gerard F., Wishart Michael, Zare Firuz, "Operation and control of a microgrid containing inertial and non - inertial micro sources." *IEEE TENCON 2009*, November 23 - 26, 2009, Singapore.
- [16] Vandoorn T.L., Renders B., Degroote L., Meersman B., Vandevelde L., "Active Load Control in Islanded Microgrids Based on the Grid Voltage", *IEEE Transactions on Smart Grids*, vol. 2, Iss. 1, pp: 139-151, 2011.
- [17] E. Dialynas, L. Daoutis. Modeling and evaluation of microgrids reliability and operational performance and its impact on service quality. *European Transactions on Electric Power* [Online]. DOI: 10.1002/ETEP.401, pp. 1-15. 2010. Available: <http://www.interscience.wiley.com>.
- [18] M.M. Mahmoud, Individual Applications of Photovoltaic Power systems, Royal Scientific Society Amman, Jordan, 1989.
- [19] G. Lehner, et al., Dynamic behavior of lead-acid Batteries with special respect to PV Conference, Spain, October 1985.
- [20] M. Galus, S. Koch, G. Andersson, "Provision of Load Frequency Control by PHEVs, Controllable Loads, and a Cogeneration Unit," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, Nr. 10, pp. 4568-4582, 2011.
- [21] S. L. Andersson, A. K. Elofsson, M. D. Galus, L. Göransson, S. Karlsson, F. Johnsson, and G. Andersson, "Plug-in hybrid electric vehicles as regulating power providers: Case studies of Sweden and Germany," *Energy Policy*, vol. 38, no. 6, pp. 2751–2762, Jun. 2010.
- [22] M. D. Galus and G. Andersson, "Integration of plug-in hybrid electric vehicles into energy systems," in *Proc. IEEE Bucharest Powertech*, Bucharest, Romania, 2009, pp. 1–8.
- [23] D.U. Sauer, G. Bopp, A. Jossen, "State-of-charge - what do we really speak about?", *INTELEC*, 1999.

- [24] Louis Rosenblam, "Practical Aspects of Photovoltaic Technology", Applications and Cost NASA, USA, 1982.
- [25] Ph.E. Pascoe, A.H. Anbuky, "Estimation of VRLA Battery Capacity Using the Analysis of Coup de Fouet Region", INTELEC, 1999.
- [26] Ch. Ehret, S. Piller, W.Schroer, A.Jossen, "State-of-charge determination for lead-acid batteries in PV-applications", in: Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, 2000.
- [27] D.Kray, D.U. Sauer, "Neuro-Methoden zur Prognose und Fehler-erkennung durch Analyse vor Daten aus Monitoring-Systemen ", Internationales Sonnenforum, Koln, 1998.
- [28] H.-P.Hones, "Elektrochemische Energiespeicher in photovoltaischen Anlagen", Dissertation, Universitat Stuttgart, 1994.
- [29] Sunny Island Installation Guide, Version 4.0, [Online]. Available: <http://www.sma.de>.
- [30] Τάκος Φώτιος, «Το υδρογόνο ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας», Πτυχιακή εργασία ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, 2011.
- [31] F. Delfino, G. B. Denegri, M. Invernizzi, R. Procopio, "An Integrated Active and Reactive Power Control Scheme for Grid-Connected Photovoltaic Production Systems," *IEEE Power Electronics Specialists Conference-IEEE PESC2008*, pp. 1463-1468, 2008.
- [32] C. Clastres, T. T. Ha Pham, F. Wurtz, S. Bacha, "Ancillary Services and Optimal Household Energy Management with Photovoltaic Production," *Energy*, vol. 35, pp. 55 - 64, 2010.
- [33] H. Yu, J. Pan, A. Xiang, "A Multi Function Grid-Connected PV System with Reactive Power Compensation for the Grid," *Solar Energy*, vol. 79, pp. 101-106, 2005.
- [34] K. Palanisami, D. P. Kothari, M. K. Mishra, S. Meikandashivam, I. J. Raglend, "Effective utilization of unified power quality conditioner for interconnecting PV modules with grid using power angle control method," *Electric Power and Energy Systems*, vol. 48, pp. 131-138, 2013.
- [35] G. Tsengenes, G. Adamidis, "A Multi-Function Grid Connected PV System with Three-Level NPC Inverter and Voltage Oriented Control," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 2595-2610, 2011.
- [36] J. A. Martinez, J. Elroy-Garcia, S. Arnaltes, "Direct Power Control of Grid-Connected PV Systems with Three-Level NPC Inverters," *Solar Energy*, vol. 84, pp. 1175-1186, 2010.
- [37] A. Samadi, M. Ghandhari, L. Soeder, "Reactive Power Dynamic Assessment of a PV System in a Distribution Grid ," *Energy Procedia*, vol. 20, pp. 98-107, 2012.
- [38] A. Cagnano, F. Torelli, F. Alfonzetti, E De Tuglie, "Can PV-plants Provide a Reactive Power Ancillary Service? A Treat Offered by an on-line Controller," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 1047-1052, 2011.
- [39] Ι. Τοππσής, «Μέθοδοι ελέγχου της ευστάθειας μικροδικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε πραγματικό χρόνο», Πτυχιακή εργασία ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, 2013.
- [40] Ritwik Majumder, Farhad Shahnia, Arindam Ghosh, Gerard Ledwich, Michael Wishart, Firuz Zare, "Operation and Control of a Microgrid Containing Inertial and Non-Inertial Micro Sources ", *IEEE TENCON 2009* , November 23 - 26, 2009, Singapore.