



ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κεφάλαιο 4^ο

ΔΠ-ΗΕ: Έλεγχος ευστάθειας μικροδικτύου –
Διαφορές από το συμβατικό δίκτυο



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 .





Έλεγχος ευστάθειας μικροδικτύου – Διαφορές από το συμβατικό δίκτυο

Τρεις βασικές αλλαγές που θα συμβούν ή έχουν εν μέρει ήδη συντελεστεί θα αλλάξουν τις παραπάνω συσχετίσεις:

- a) 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,





Έλεγχος ευστάθειας μικροδικτύου – Διαφορές από το συμβατικό δίκτυο

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





Έλεγχος ευστάθειας μικροδικτύου – Διαφορές από το συμβατικό δίκτυο

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





Έλεγχος ευστάθειας μικροδικτύου – Διαφορές από το συμβατικό δίκτυο

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**,





Έλεγχος ευστάθειας μικροδικτύου – Διαφορές από το συμβατικό δίκτυο

- 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**





Έλεγχος ευστάθειας μικροδικτύου – Διαφορές από το συμβατικό δίκτυο

Ως εκ τούτου, ακολουθούν τα ακόλουθα μέρη:

1. 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, και

2. στη συνέχεια περιγράφεται ο πρωτοβάθμιος, δευτεροβάθμιος και τριτοβάθμιος έλεγχος σε ένα μικροδίκτυο



Ρύθμισης τάσης και συχνότητας

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



Ρύθμισης τάσης και συχνότητας στο συμβατικό δίκτυο

Η υψηλή διείσδυση 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.



Αιτίες αναποτελεσματικότητας στο έξυπνο δίκτυο

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.



Αιτίες αναποτελεσματικότητας στο έξυπνο δίκτυο

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.



Παραλλαγή για εφαρμογή στο έξυπνο δίκτυο

Επιπλέον:

όταν οι μονάδες ΔΠ και τα φορτία δεν είναι συμμετρικά κατανεμημένα 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].



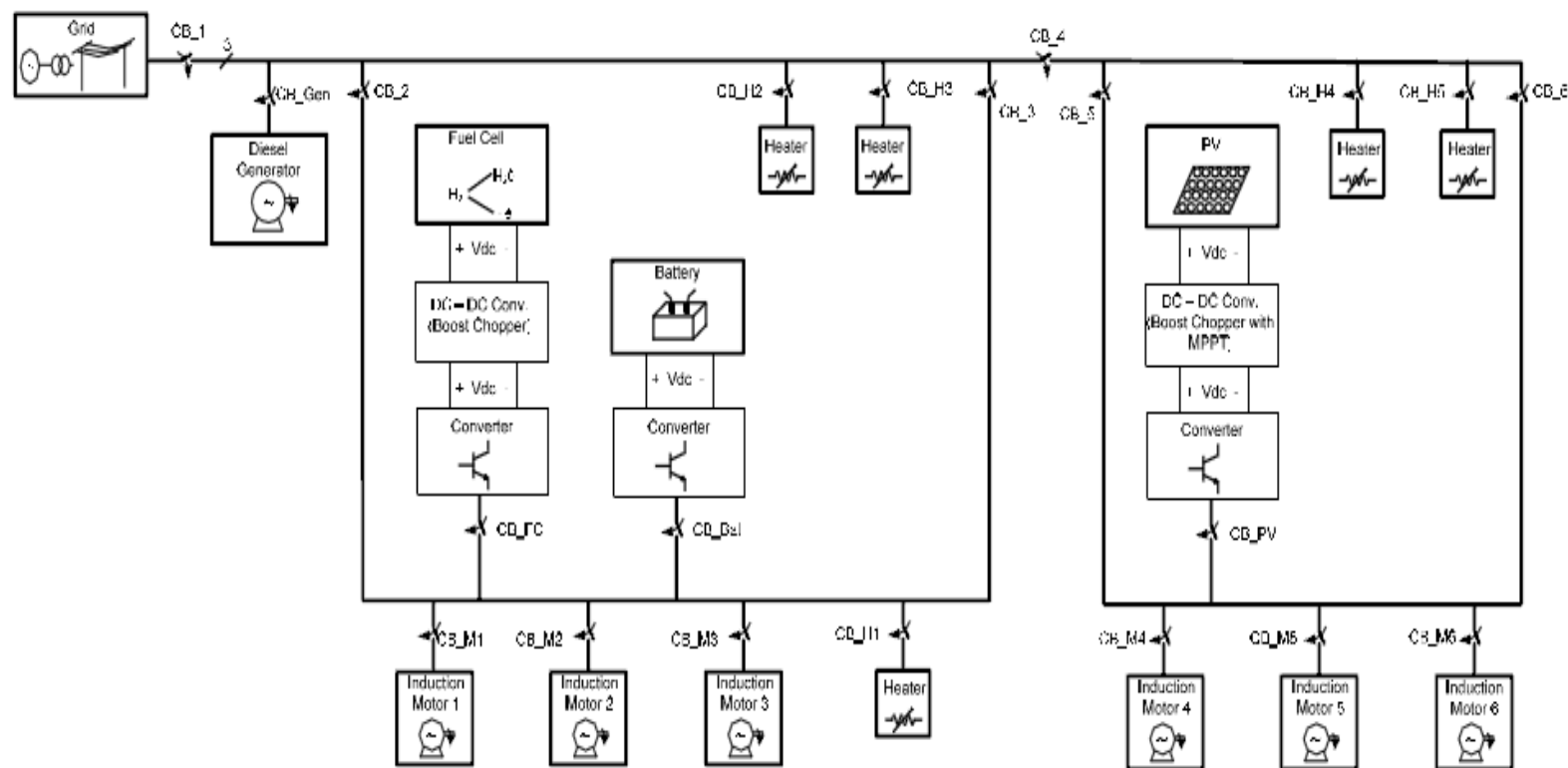


Περιγραφή ενός τυπικού μικροδικτύου

Το **σύστημα** του **μικροδικτύου** που είναι υπό **εξέταση** φαίνεται στο Σχήμα 1. Υπάρχουν **τέσσερις μονάδες ΔΠ**, όπως φαίνεται: **μία** από αυτές είναι μια **αδρανειακή πηγή** (ντίζελ - γεννήτρια), ενώ οι άλλες είναι **πηγές μετατροπών** (η ΦΒ, κυψέλες καυσίμου και μπαταρία). Υπάρχουν **5 ωμικά φορτία** και **6 επαγωγικοί κινητήρες**.



Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας



Σχ. 1: Δομή του υπό εξέταση συστήματος [40].

Μέθοδος ελέγχου πτώσης (droop control)

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.

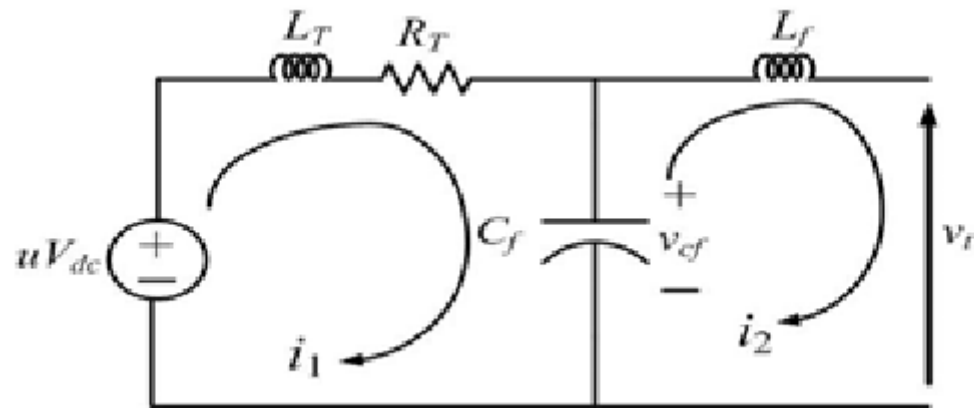
Για να αυξηθεί η απόκριση του συστήματος και να περιοριστεί το ποσοστό της μεταβολής της ισχύος σε μη αδρανειακές μονάδες ΔΠ, οι εξισώσεις ελέγχου πτώσης τροποποιούνται ως εξής:

$$\omega = \omega_s - m(P_{\text{rated}} - P) + m_d * dP/dt$$
$$V = V^* - n(Q_{\text{rated}} - Q) + n_d * dQ/dt$$

Η μοντελοποίηση του Inverter

Η μοντελοποίηση του Inverter

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

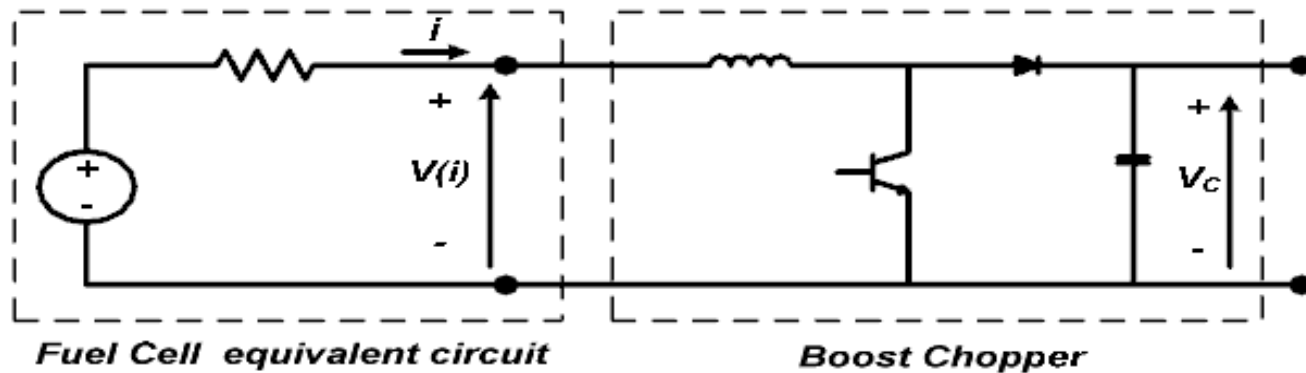


Σχ. 2: Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα για την προσομοίωση [40]

Τα μοντέλα των μονάδων ΔΠ

Α. Κυψέλη καυσίμου

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

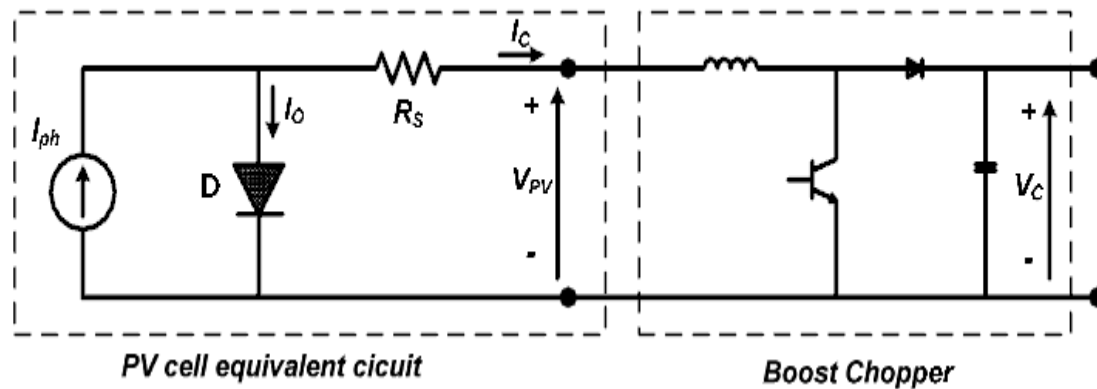


Σχ.3: Κύκλωμα κυψέλης καυσίμου [40].

Τα μοντέλα των μονάδων ΔΠ

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.



Σχ.4: Κύκλωμα ΦΒ [40].



Τα μοντέλα των μονάδων ΔΠ

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.

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.

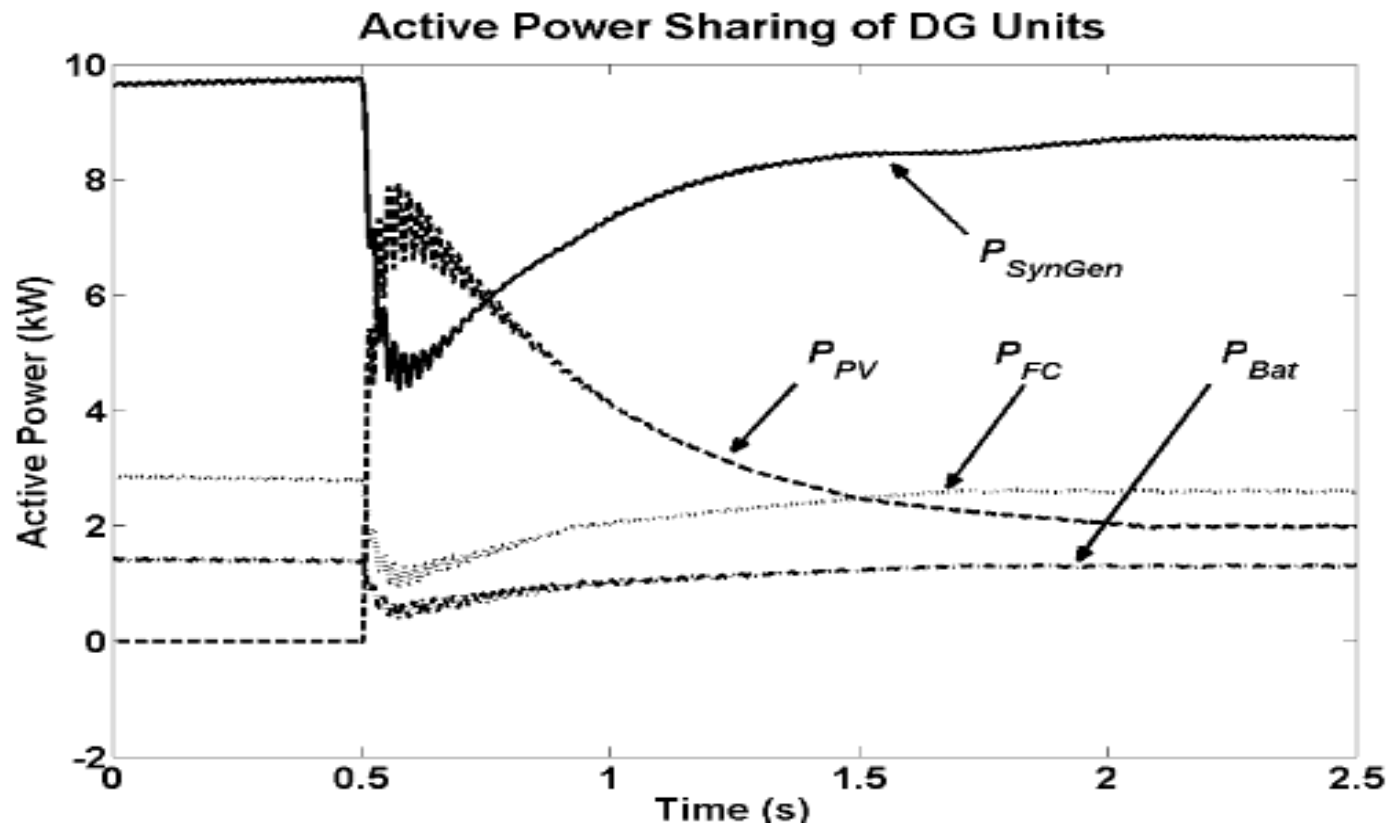
Μελέτες προσομοίωσης

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.

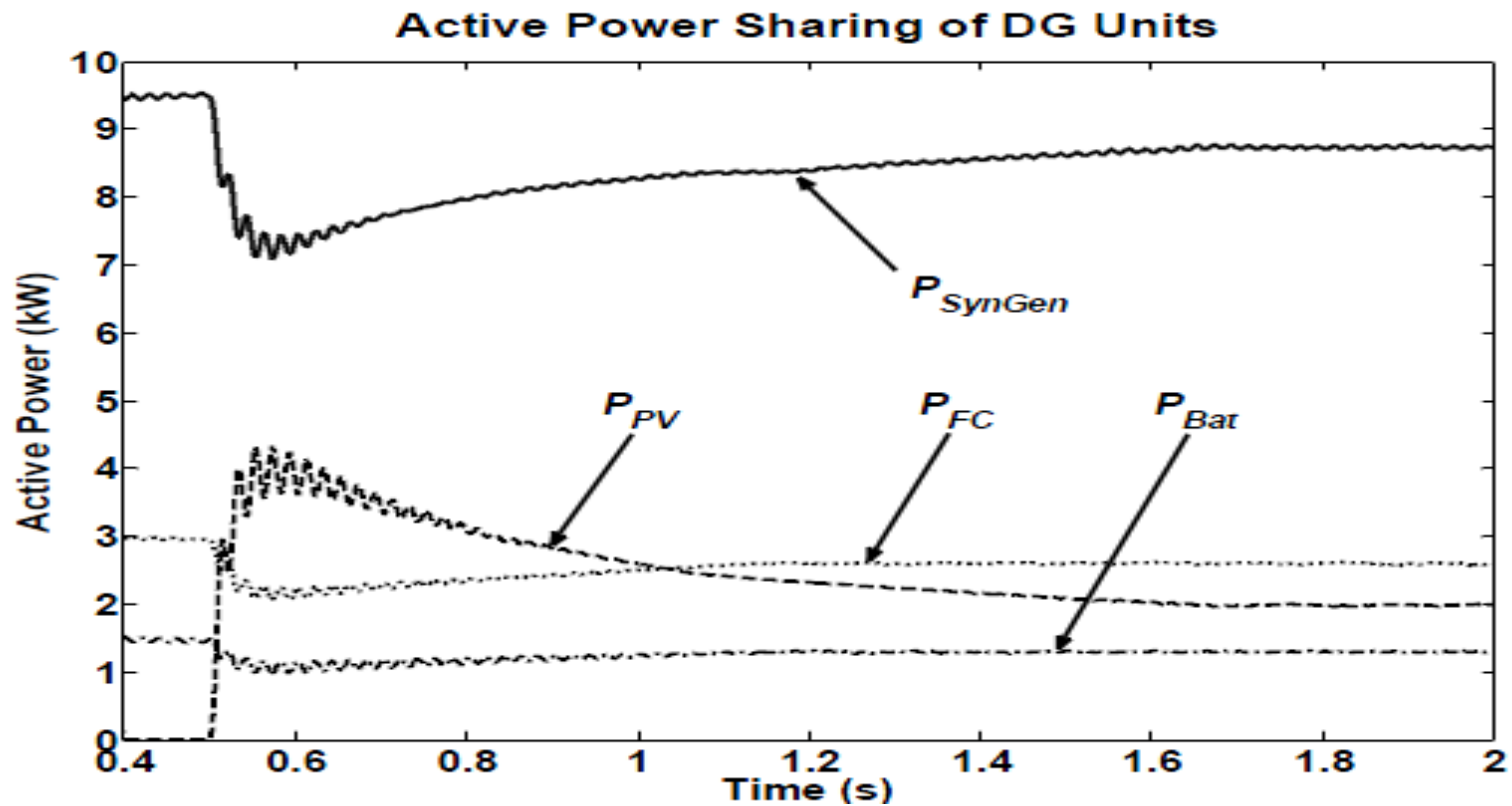
Είναι προφανές έχει μειωθεί η υπέρβαση στην παραγόμενη ισχύ του PV.

Μελέτες προσομοίωσης



Σχ. 5: Λειτουργία χωρίς έλεγχο του μετατροπέα [40]

Μελέτες προσομοίωσης



Σχ. 6: Λειτουργία με έλεγχο του μετατροπέα [40]



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.



Πρωτοβάθμιος, δευτεροβάθμιος και τριτοβάθμιος έλεγχος μικροδικτύου

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.



Πρωτοβάθμιος, δευτεροβάθμιος και τριτοβάθμιος έλεγχος μικροδικτύου

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).



Πρωτοβάθμιος έλεγχος

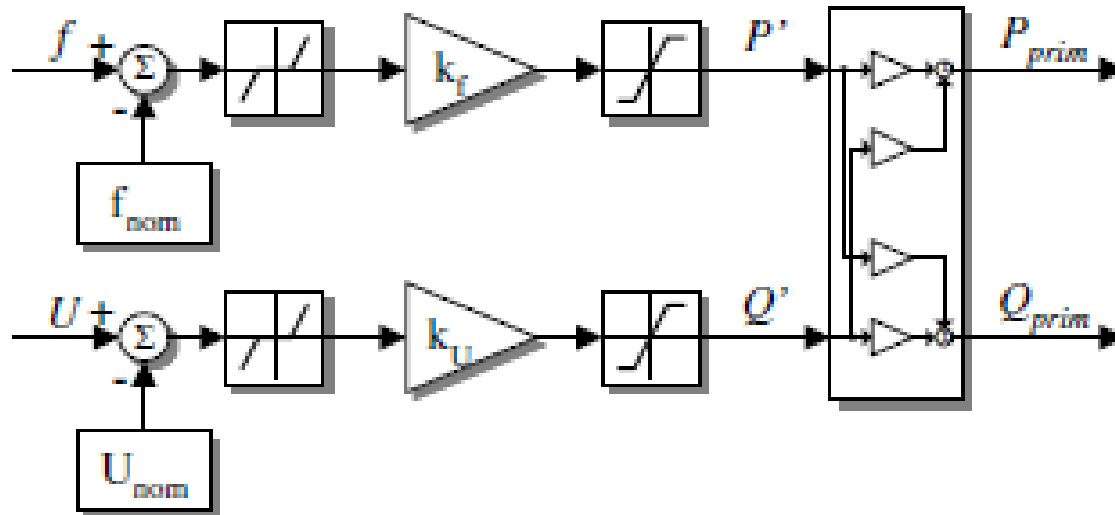
Εξασφάλιση αξιόπιστης λειτουργίας, ακόμη και όταν η επικοινωνία έχει αποτύχει

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 7). 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.

Πρωτοβάθμιος έλεγχος



Σχήμα 7: Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα του πρωτογενούς δομικού ελέγχου, ενσωματώνοντας νεκρές ζώνες και περιοριστές τόσο σε συχνότητα όσο και τον έλεγχο της τάσης



Πρωτοβάθμιος έλεγχος

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 .



Δευτεροβάθμιος 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.



Δευτεροβάθμιος έλεγχος

Βελτιστοποίηση της ποιότητας ισχύος

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.





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.



Τριτοβάθμιος έλεγχος

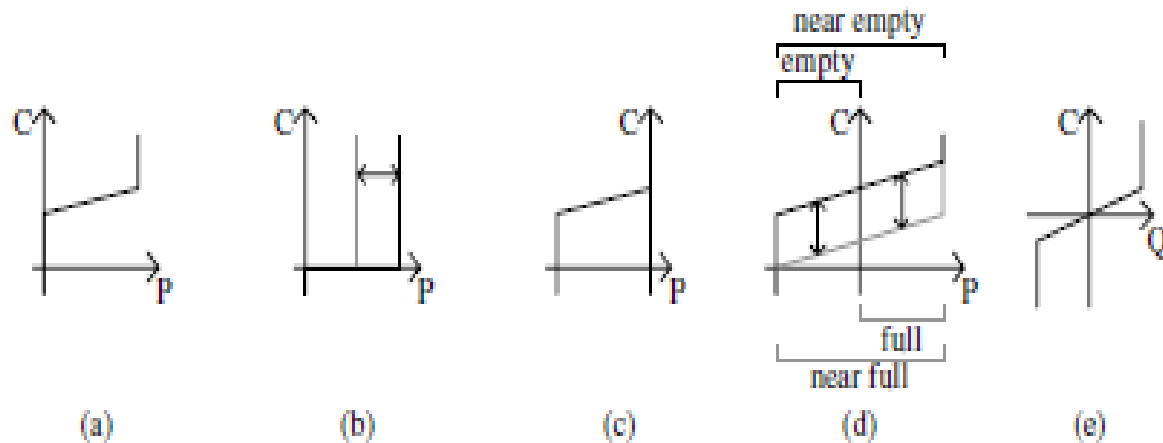
Οικονομική βελτιστοποίηση

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 κατανεμημένο χρησιμοποιώντας ένα gossip αλγόριθμο.

Το Σχήμα 8 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:



Τριτοβάθμιος έλεγχος



Σχήμα 8: Οριακό κόστος λειτουργίας ορισμένων βασικών μονάδων ΔΠ:

(α) ντιζελογεννήτριας, (β) Φ/Β, (γ) ευφυούς φορτίου, (δ), μονάδας αποθήκευσης, και (ε) άεργης ισχύος

Τριτοβάθμιος έλεγχος

- (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

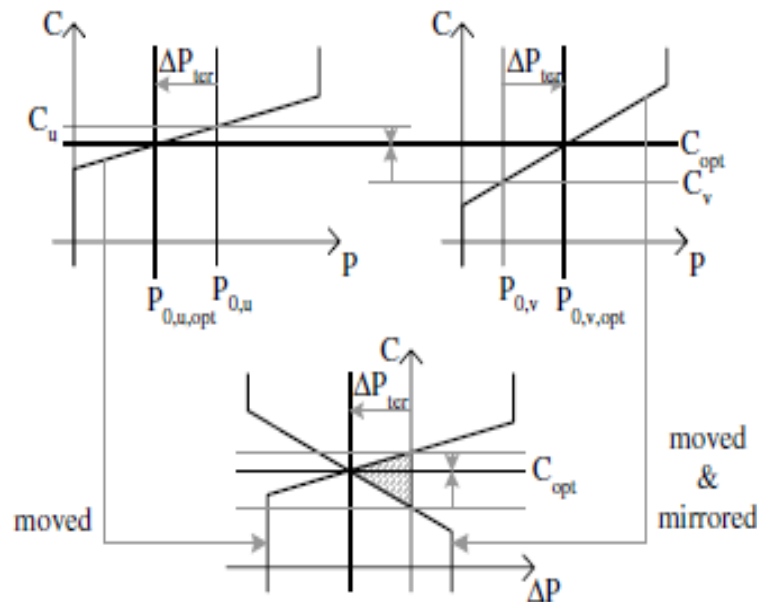


Τριτοβάθμιος έλεγχος

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 9 φαίνεται το ταίριασμα του οριακού κόστους δύο μονάδων

Τριτοβάθμιος έλεγχος



Σχ. 9: Αντιστοίχιση συναρτήσεων οριακού κόστους δύο μονάδων ΔP . [14]