

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μικροδίκτυα απαιτούν εκτεταμένο έλεγχο για να επιτύχουν ασφάλεια του συστήματος, βέλτιστη λειτουργία, μειωμένες εκπομπές ρύπων και ομαλή μετάβαση από τη συνδεδεμένη με το δίκτυο κατάσταση λειτουργίας στην αποσυνδεδεμένη, χωρίς παραβίαση των προδιαγραφών και των απαιτήσεων του ρυθμιστή του συστήματος. Αυτός ο έλεγχος παρέχεται από τον κεντρικό ελεγκτή (Central Controller (CC), §3.4) και τους εξειδικευμένους ελεγκτές των μικροπαραγωγών και των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας (Microsource Controller (MC), §3.3).

Όπως δηλώνει και το όνομά τους, οι MCs διεξάγουν τον τοπικό έλεγχο των λειτουργιών των μικροπαραγωγών. Ο CC εκτελεί το συνολικό έλεγχο της λειτουργίας του μικροδίκτυου και της προστασίας μέσω των MC. Η κύρια λειτουργία του CC είναι να διατηρεί την αξιοπιστία και την ποιότητα ισχύος μέσω του καθορισμού των σημείων αναφοράς (λειτουργίας) των ελεγκτών ισχύος-συχνότητας (P-f control) και άεργου ισχύος-τάσης (Q-V control) και του συντονισμού της προστασίας. Επίσης εκτελεί τον προγραμματισμό οικονομικής λειτουργίας των μικροπαραγωγών και βοηθάει στη διατήρηση της εισαγόμενης ισχύος από το κύριο δίκτυο εντός των συμφωνηθέντων τιμών. Έτσι, ο CC όχι μόνο συντονίζει το σύστημα προστασίας για ολόκληρο το μικροδίκτυο, αλλά παρέχει και τα σημεία λειτουργίας τάσης και ισχύος για τους MC, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των καταναλωτών. Επομένως, ο CC εξασφαλίζει την ενεργειακή βελτιστοποίηση του μικροδίκτυου και διατηρεί την ονομαστική συχνότητα και το προφίλ της τάσης για τα ηλεκτρικά φορτία. Αυτός ο ελεγκτής είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί αυτόματα, αλλά να δέχεται και παρέμβαση από τον χειριστή όταν κρίνεται απαραίτητο. Παρακολουθεί συνεχώς τη λειτουργία των MC μέσω δύο εφαρμογών, της εφαρμογής διαχείρισης ενέργειας (Energy Manager Module (EMM), §3.4.1) και της εφαρμογής συντονισμού της προστασίας (Protection Co-ordination Module (PCM), §3.4.2).

3.2 ΑΝΑΓΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ

Οι ανάγκες διαχείρισης του μικροδίκτυου καλύπτονται κυρίως από το EMM υποστηριζόμενο από το PCM και μεμονωμένους MCs. Ο EMM διεξάγει έλεγχο της παραγωγής των μικροπαραγωγών, έλεγχο των οικιακών διεργασιών (όπως κλιματισμό), βελτιστοποίηση θέρμανσης και ψύξης του νερού και έλεγχο της διαδικασίας αποθήκευσης ενέργειας, διατηρώντας την ποιότητα ισχύος και παρέχοντας βοηθητικές τοπικές υπηρεσίες. Σε πρώτο στάδιο, ο EMM πραγματοποιεί τους βασικούς ελέγχους και σταδιακά μπορεί να επεκταθεί σε πιο σύνθετους ελέγχους αξιοποιώντας τις ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας ethernet.

Η διαχείριση του μικροδίκτυου μέσω του EMM πρέπει να εστιάζει στις παρακάτω περιοχές:

Έλεγχος της παραγωγής των μικροπαραγωγών.

Οι μικροπαραγωγές χρησιμοποιούν διάφορες ΑΠΕ και χαμηλών εκπομπών ρύπων τεχνολογίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανανεώσιμες μικροπαραγωγές έχουν ελάχιστο κόστος καυσίμου, αλλά πρέπει να παράγουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ όταν το «καύσιμο» είναι διαθέσιμο. Οι μικροπαραγωγές που χρησιμοποιούν καύσιμα όπως φυσικό αέριο, υδρογόνο κτλ. για τη λειτουργία τους πρέπει να λειτουργούν όταν η λειτουργία τους γίνεται πιο οικονομική. Οι CHP μικροπαραγωγές παράγουν θερμότητα μαζί με ηλεκτρισμό. Έτσι, για αυτές το θερμικό φορτίο πρέπει επίσης να εξισορροπείται. Επομένως, η επιλογή της χρονικής περιόδου λειτουργίας και του αντίστοιχου επίπεδου ισχύος τους είναι αρκετά πολύπλοκη και εξαρτάται από το κόστος καυσίμου, τη διαφορά κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας και την επίδραση των εκπομπών ρύπων. Ο σημαντικότερος σκοπός του ελέγχου παραγωγής των μικροπαραγωγών είναι η εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής εξοικονόμησης ενέργειας.

Ο έλεγχος της παραγωγής CHP μικροπαραγωγών πρέπει να θέτει προτεραιότητα στην παραγωγή θερμότητας ή στην παραγωγή ηλεκτρισμού, γιατί οι απαιτήσεις για τα αντίστοιχα φορτία δεν συμπίπτουν πάντοτε. Μερικές μικροπαραγωγές παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες όπως ρύθμιση τάσης, στρεφόμενη εφεδρεία, εξομάλυνση των αιχμών φορτίου και αντιμετώπιση των βυθίσεων στην τάση του δικτύου. Αυτές οι υπηρεσίες παρέχουν ικανοποιητικό όφελος, αλλά και οι προσφορές της αγοράς επίσης παίζουν σημαντικό ρόλο.

Έλεγχος οικιακών διαδικασιών.

Αυτό το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί και ελέγχει τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού ενός κτιρίου, δηλαδή συστήματα κεντρικής θέρμανσης, ψυγεία, ανεμιστήρες, υγραντές και αντλίες. Αυτός ο εξοπλισμός μπορεί να τροφοδοτείται από τις CHP μικροπαραγωγές του μικροδίκτυου. Οι μικροπαραγωγές πρέπει να βελτιστοποιήσουν την παραγωγή θερμότητας για αυτές τις ανάγκες λαμβάνοντας υπόψη και τις άλλες απαιτήσεις, όπως την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών και τη μείωση των εκπομπών ρύπων και κόστους. Αρκετές μεταβλητές πρέπει να βελτιστοποιηθούν ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη ενεργειακή απόδοσή τους, με τα σημεία λειτουργίας να εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες, το κόστος του καυσίμου και την αρχιτεκτονική του κτιρίου. Η συνδυασμένη βελτιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας πραγματοποιείται από τον EMM χωρίς αυτός να παρεμποδίζει τη λειτουργία των εξειδικευμένων ελεγκτών θέρμανσης, ψύξης κ.λ.π.

Η παραγωγή θερμότητας από λέβητες και κλιβάνους είναι πιο οικονομική τις ώρες χαμηλού κόστους καυσίμου, ενώ είναι πιο οικονομικό να λειτουργούν τα CHP συστήματα με τη μέγιστη ισχύ κατά τις περιόδους αιχμής, όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλό. Έτσι, ο EMM πρέπει να συλλέγει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και του φυσικού αερίου για σύγκριση των τιμών καυσίμου, καθώς και βραχυχρόνιες προβλέψεις καιρού για να εξασφαλίζει βέλτιστη και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

Ιδανικά, ο EMM θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες ανάγκες ελέγχου με τη βοήθεια των MCs:

- Προγραμματισμός της σωστής ανάκτησης θερμότητας από τις παραγωγές και έλεγχός τους.
- Κατάλληλη αξιοποίηση της αποβαλλόμενης θερμότητας.
- Έλεγχος της θερμοκρασίας νερού στην έξοδο του εναλλάκτη θερμότητας για προστασία από υπερθέρμανση.
- Έλεγχος της θερμοκρασίας των αερίων στην είσοδο του εναλλάκτη θερμότητας, ώστε το σύστημα ανάκτησης θερμότητας να παρακάμπτεται σε πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Αποθήκευση ενέργειας.

Για να εξασφαλιστεί αδιάλειπτη τροφοδοσία των σημαντικών φορτίων, ο EMM πρέπει να ελέγχει τη λειτουργία των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας, όπως

σφόνδυλοι, υπερπυκνωτές και μπαταρίες. Στην πραγματικότητα, η επιτυχής λειτουργία του μικροδίκτυου εξαρτάται αρκετά από τη σωστή λειτουργία και τον έλεγχο των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε έκτακτες καταστάσεις και διαταραχές. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίζουν βυθίσεις τάσης σε τοπικούς ζυγούς ή ως εφεδρική πηγή ενέργειας κατά τη διάρκεια διακοπών και όχι για να αξιοποιούν την ωριαία τιμή ενέργειας ή να εξομαλύνουν τις αιχμές φορτίου. Καθώς κάποιες μικροπαραγωγές έχουν μικρή αδράνεια ή ικανότητα υπερπήδησης βραχυκυκλωμάτων, αυτές οι συσκευές αποθήκευσης βοηθούν επίσης στην τροφοδοσία των μικροπαραγωγών αυτών κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής, εκκινήσεις κινητήρων ή βραχυπρόθεσμων υπερφορτώσεων, κυρίως κατά τη διάρκεια της απομονωμένης λειτουργίας.

Εφόσον οι περισσότερες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας παράγουν ΣΡ τάση, πρέπει να είναι συνδεδεμένες στους αντιστροφείς των μικροπαραγωγών για μετατροπή ΣΡ/ΕΡ. Αντίθετα, γεννήτριες στροβίλων παράγουν ΕΡ τάση και επομένως συνδέονται απευθείας στον ζυγό του μικροδίκτυου. Για να αποκρίνονται γρήγορα οι συσκευές αποθήκευσης πρέπει να χρησιμοποιούν δικό τους ελεγκτή και να μην εξαρτώνται από τις εντολές του EMM.

Ρύθμιση και μετατόπιση φορτίου (load shifting).

Αντίθετα με τα συμβατικά δίκτυα, το προφίλ του φορτίου του μικροδίκτυου περιλαμβάνει βραχυχρόνιες αιχμές εξαιτίας της φύσης και της χρήσης των φορτίων αυτών. Αυτό συμβαίνει επειδή οικιακά φορτία, όπως θερμαντές νερού, φούρνοι και αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα. Αυτές οι αιχμές γίνονται πιο έντονες για εμπορικούς καταναλωτές, όπως ξενοδοχεία και εστιατόρια. Ωστόσο, εάν αρκετοί καταναλωτές όπως οι παραπάνω με αιχμές φορτίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές συγκεντρωθούν, το συνολικό προφίλ του φορτίου του μικροδίκτυου αλλάζει και εξομαλύνονται οι αιχμές. Γενικά, για ένα μικροδίκτυο, όσο μικρότερο είναι το συνολικό μέγεθος του φορτίου, τόσο μεγαλύτερη αιχμή παρουσιάζει το προφίλ του φορτίου του και χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας στην απομονωμένη λειτουργία. Στην περίπτωση αυτή, η φόρτιση των συσκευών αποθήκευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επιπλέον φορτίο για να γίνει το προφίλ του φορτίου πιο επίπεδο.

Μια σημαντική λειτουργία του EMM είναι η εξομάλυνση του προφίλ του ηλεκτρικού φορτίου με κατάλληλο προγραμματισμό των φορτίων, ρυθμίζοντας το

χρόνο φόρτισης των συσκευών αποθήκευσης και μετατοπίζοντας επιμέρους μέγιστα του φορτίου. Επίσης ο EMM μπορεί να προγραμματίζει την αποθήκευση θερμικής ενέργειας τις ώρες χαμηλού κόστους ενέργειας, ώστε να εξομαλυνθεί το προφίλ του φορτίου τις ώρες μέγιστης ζήτησης.

Ως ρύθμιση (regulation) ορίζεται η συνεχής προσαρμογή της παραγωγής στις απαιτήσεις του φορτίου. Για να επιτευχθεί βραχυπρόθεσμη (π.χ. ανά δευτερόλεπτο) ρύθμιση, το μικροδίκτυο πρέπει να έχει μεγαλύτερη παραγωγή αιχμής απ' ό,τι για μακροπρόθεσμη (π.χ. ανά λεπτό) ρύθμιση. Σε απομονωμένη λειτουργία πρέπει να έχουμε βραχυπρόθεσμη ρύθμιση, γιατί δεν υπάρχει η βοήθεια του δικτύου. Ο EMM πρέπει να αποσυνδέει τα φορτία χαμηλής προτεραιότητας και να τροφοδοτεί τα κρίσιμα φορτία με την υποστήριξη και του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Σε αντίθετη περίπτωση το μικροδίκτυο μπορεί να υποστεί βύθιση τάσης και να οδηγηθεί σε κατάρρευση. Έτσι, για γρήγορη παρακολούθηση του φορτίου, οι μικροπαραγωγές πρέπει να βοηθούνται από τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, που διαθέτουν γρήγορο ηλεκτρονικό έλεγχο. Επίσης, ο EMM πρέπει να υλοποιεί αλγόριθμους για την ορθή πρόβλεψη κυρίως των μεγαλύτερων φορτίων, καθώς και για την αξιολόγηση της επίδρασής τους στο σύστημα.

Βοηθητικές υπηρεσίες.

Υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις για τις υπηρεσίες που θα μπορούσε να προσφέρει το μικροδίκτυο. Κατά μία οπτική, μπορεί να συμπεριφέρεται ως ένα σύνολο ελεγχόμενων φορτίων με τον αναγκαίο έλεγχο στη ζήτηση ισχύος και των συντελεστών ισχύος. Από μια άλλη οπτική, το μικροδίκτυο μπορεί να πουλάει ενέργεια στο κύριο δίκτυο κατά τις περιόδους αιχμής μέσω της ρυθμιζόμενης αγοράς. Συνολικά, το μικροδίκτυο θα μπορούσε να προσφέρει αρκετές πολύτιμες βοηθητικές υπηρεσίες στο κύριο δίκτυο και τους καταναλωτές, με την κατάλληλη αμοιβή.

Τεχνικά, είναι πιο βολικό το μικροδίκτυο να φαίνεται από την πλευρά του δικτύου σαν ένα ελεγχόμενο φορτίο, κυρίως επειδή το μικροδίκτυο είναι σχεδιασμένο να παρέχει ισχύ σε φορτία διευκολύνοντας τη ροή ισχύος προς δύο κατευθύνσεις. Ωστόσο, η σημαντικότητα του μικροδικτύου είναι ότι μπορεί να παρέχει σημαντικές βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο για τη διατήρηση της ποιότητας ισχύος, κυρίως όταν το σύστημα είναι υπό πίεση. Οι περισσότερες βοηθητικές υπηρεσίες αφορούν την εξασφάλιση ενεργειακής ισορροπίας σε πραγματικό χρόνο μεταξύ μικροπαραγωγών και φορτίων. Η υπηρεσία εκκίνησης του συστήματος

μετά από συνολική συσκότιση (black start) έχει ιδιαίτερη σημασία και για το ίδιο το μικροδίκτυο, ώστε να εξασφαλίζει τη τροφοδοσία των κύριων φορτίων του χωρίς ανταλλαγή ισχύος με το κύριο δίκτυο. Στη σημερινή απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, η μεγαλύτερη πρόκληση για το μικροδίκτυο, ώστε να μπορεί να συμμετέχει στην παροχή των βοηθητικών υπηρεσιών και τις αγοραπωλησίες ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η ταχύτητα του συστήματος επικοινωνίας.

3.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΙΚΡΟΠΑΡΑΓΩΓΩΝ (Microsource Controller (MC))

Οι μικροπαραγωγές και οι συσκευές αποθήκευσης σε ένα μικροδίκτυο έχουν ενσωματωμένους MC για την ομαλή και ευέλικτη λειτουργία των συσκευών αυτών, ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις των καταναλωτών και του δικτύου. Οι MC μπορούν να λειτουργήσουν με ή χωρίς παρέμβαση από τον CC και η λειτουργία τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος των συσκευών αποθήκευσης και των μικροπαραγωγών.

Οι MC εξασφαλίζουν ότι:

- Νέες μικροπαραγωγές μπορούν να προστεθούν στο σύστημα χωρίς μεταβολές στην υπάρχουσα ρύθμιση του μικροδίκτυου.
- Το μικροδίκτυο μπορεί να συνδέεται/αποσυνδέεται από το δίκτυο με γρήγορο και ομαλό τρόπο.
- Η παραγωγή πραγματικής και άεργης ισχύος μπορεί να ελεγχθεί ξεχωριστά.
- Οι βυθίσεις τάσης και οι μη κανονικές καταστάσεις του συστήματος μπορούν να διορθωθούν.
- Τα σφάλματα μπορούν να αντιμετωπιστούν χωρίς την απώλεια της ευστάθειας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού ενός MC είναι:

- Δεν πρέπει να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των μικροπαραγωγών χωρίς την παρέμβαση του CC. Κάθε MC αποκρίνεται αποτελεσματικά στις μεταβολές του συστήματος χωρίς να χρειάζεται δεδομένα από τους άλλους MCs.
- Ο MC μπορεί να προσπερνά τις οδηγίες του CC εφόσον αυτές κρίνονται μη αποδεκτές για τη μικροπαραγωγή που ελέγχει ο MC.

3.3.1 Λειτουργίες ελέγχου του MC

Οι ενσωματωμένες λειτουργίες ελέγχου του MC είναι:

- 1) Έλεγχος πραγματικής και άεργης ισχύος,
- 2) ή Έλεγχος συχνότητας και τάσης.
- 3) Απαιτήσεις αποθήκευσης για γρήγορη ικανοποίηση του φορτίου.
- 4) Μοίρασμα φορτίου στις μικροπαραγωγές μέσω P-f ελέγχου.

Οι ενσωματωμένες λειτουργίες θα πρέπει να εξασφαλίζουν ότι οι μικροπαραγωγές αναλαμβάνουν γρήγορα το μέρος του φορτίου που τους αναλογεί, όταν το μικροδίκτυο αποσυνδέεται από το κύριο δίκτυο. Οι MC πρέπει να διασφαλίζουν την απρόσκοπτη μεταγωγή από την διασυνδεδεμένη στην απομονωμένη κατάσταση λειτουργίας και αντίστροφα με την ελάχιστη διαταραχή και στα δύο συστήματα.

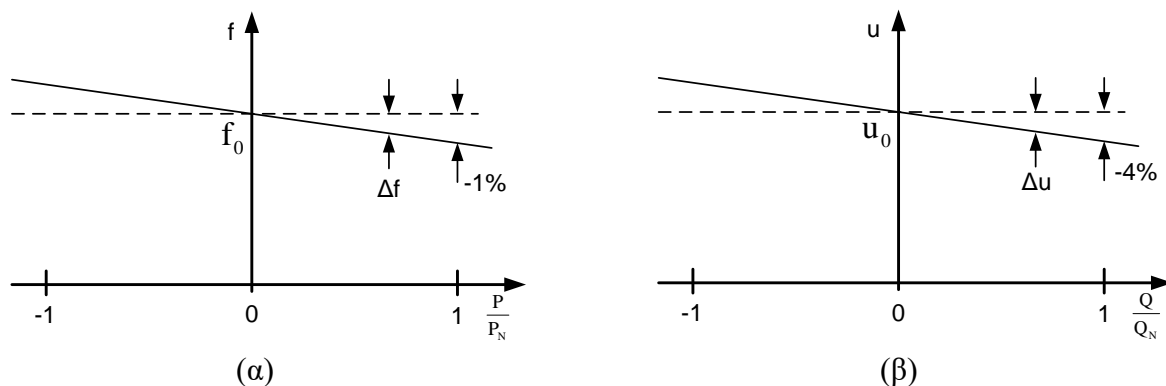
3.3.2 Έλεγχος πραγματικής και άεργης ισχύος

Οι μικροπαραγωγές μπορεί να είναι:

- Πηγές ΣΡ, όπως Φ/Β συστήματα, κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες.
- Πηγές ΕΡ, όπως ανεμογεννήτριες και μικροστρόβιλοι.

Για την πρώτη κατηγορία, η ΣΡ ισχύς μετατρέπεται σε ΕΡ ισχύ επιθυμητής συχνότητας, ενώ για τη δεύτερη κατηγορία η ισχύς ΕΡ σε όχι τυπική συχνότητα ανορθώνεται αρχικά σε ΣΡ και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ΕΡ ισχύ επιθυμητής συχνότητας. Η μετατροπή ΣΡ/ΕΡ και στις δύο περιπτώσεις πραγματοποιείται μέσω ενός αντιστροφέα πηγής τάσης (Voltage Source Inverter (VSI)).

Κατά μία μέθοδο, για τον έλεγχο της ισχύος VSI χρησιμοποιούνται ελεγκτές στατισμού (droops) για την πραγματική ισχύ/συχνότητα και την άεργο ισχύ/τάση, Σχ. 3.1. Ενδεικτικές τιμές της κλίσης αυτών των χαρακτηριστικών είναι $-(0.5-2)$ Hz/puKVA και $-(0.02-0.06)$ puV/puKVar, για το στατισμό της συχνότητας και της



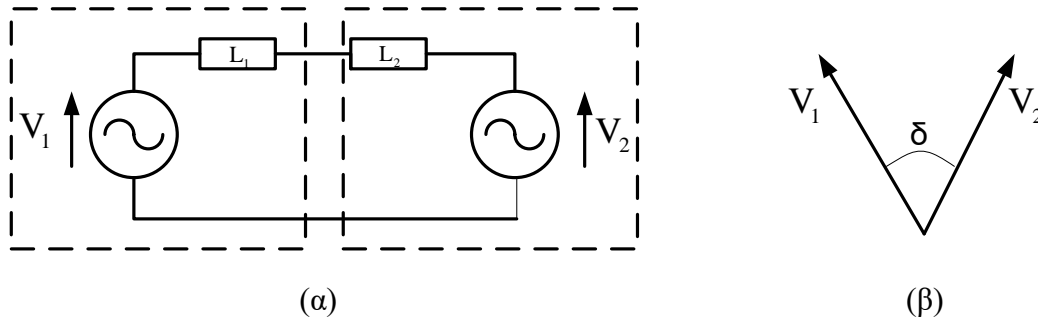
Σχ. 3.1 Χαρακτηριστικές στατισμού (α) Συχνότητας. (β) Τάσης.

τάσης αντίστοιχα. Αυτοί οι έλεγχοι δρουν παρόμοια με αυτούς που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των συμβατικών στρεφόμενων γεννητριών στα μεγάλα ΣΗΕ και δεν απαιτούν συστήματα επικοινωνιών και/ή επιπλέον καλωδιώσεις. Ο κεντρικός έλεγχος παρέχει απλά τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας για κάθε VSI, όπως συχνότητα αναφοράς f_0 , τάση αναφοράς εξόδου

u_0 , κλίση στατισμού, κ.λ.π. Για τον έλεγχο των VSIs χρησιμοποιούνται οι τοπικές μεταβλητές του δικτύου τάση και συχνότητα. Οι VSIs συνδέουν τις μικροπαραγωγές στο δίκτυο μέσω των φίλτρων τους και των συνθέτων αντιστάσεων του δικτύου. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας ελέγχου είναι:

- Εύκολη επέκταση του συστήματος.
- Αύξηση της διαθεσιμότητας του συστήματος και αποφυγή της εξάρτησης από τα συστήματα επικοινωνιών.
- Βελτιστοποίηση βασισμένη σε ένα σύστημα με ένα απλό ζυγό.
- Απλοποιημένος κεντρικός έλεγχος με περισσότερες σύνθετες λειτουργίες ελέγχου να ανατίθενται στις συνιστώσες.

Δύο VSIs συνδεδεμένοι παράλληλα φαίνονται στο Σχ. 3.2, όπου οι επαγωγές σύζευξης L_1 και L_2 οφείλονται στα φίλτρα τους και την καλωδίωση σύνδεσής



Σχ. 3.2 VSIs συζευγμένοι μέσω επαγωγών: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα. (β) Διάγραμμα παραστατικών μιγάδων.

τους, ενώ στην έξοδό τους θεωρούμε μόνο την τάση στη θεμελιώδη συχνότητα (rms τιμή). Η πραγματική P και άεργος Q ισχύς που μεταφέρονται μεταξύ των VSIs δίνονται από τις εξισώσεις:

$$P = \frac{|V_1||V_2|}{\omega(L_1 + L_2)} \sin \delta \quad (3.1)$$

$$Q = \frac{|V_1|^2}{\omega(L_1 + L_2)} - \frac{|V_1||V_2|}{\omega(L_1 + L_2)} \cos \delta \quad (3.2)$$

Η ροή πραγματικής ισχύος καθορίζεται από τη διαφορά των γωνιών των τάσεων δ , ενώ η άεργος ισχύς καθορίζεται από τη διαφορά των μέτρων των τάσεων $|V_1| - |V_2| \cos \delta$. Τα μικροδίκτυα με μεγάλο αριθμό μικροπαραγωγών μπορεί να πάσχουν από τα μεγάλα άεργα κυκλικά ρεύματα ανάμεσα στις μικροπαραγωγές.

Στο κύριο δίκτυο τα ρεύματα αυτά περιορίζονται από τη μεγάλη εμπέδηση μεταξύ των γεννητριών, ωστόσο στην περίπτωση του μικροδίκτυου η εμπέδηση μεταξύ των μικροπαραγωγών είναι μικρή και μικρές διακυμάνσεις του μέτρου και της φασικής γωνίας των τάσεων μπορούν να δημιουργήσουν ρεύματα μεγαλύτερα των ονομαστικών ρευμάτων στις μικροπαραγωγές. Λόγω αυτής της ευαισθησίας ο έλεγχος των VSIs με σταθερή συχνότητα και τάση αποτυγχάνει, διότι: 1) Υπάρχει πάντα μία μικρή διαφορά στα μέτρα των τάσεων λόγω ανακριβειών των αισθητήρων, των τιμών αναφοράς, των επιδράσεων της θερμοκρασίας και της γήρανσης (περίπου 1-5%). 2) Επίσης για τον υπολογισμό της διαφοράς των γωνιών των τάσεων χρησιμοποιείται το ολοκλήρωμα του σφάλματος της συχνότητας στο χρόνο και οι κρύσταλλοι που χρησιμοποιούνται για την αναφορά του χρόνου δεν είναι ταυτοτικοί. Λόγω των προαναφερθέντων προβλημάτων η παράλληλη λειτουργία των VSIs απαιτεί ακριβή έλεγχο με σύνθετους αλγορίθμους.

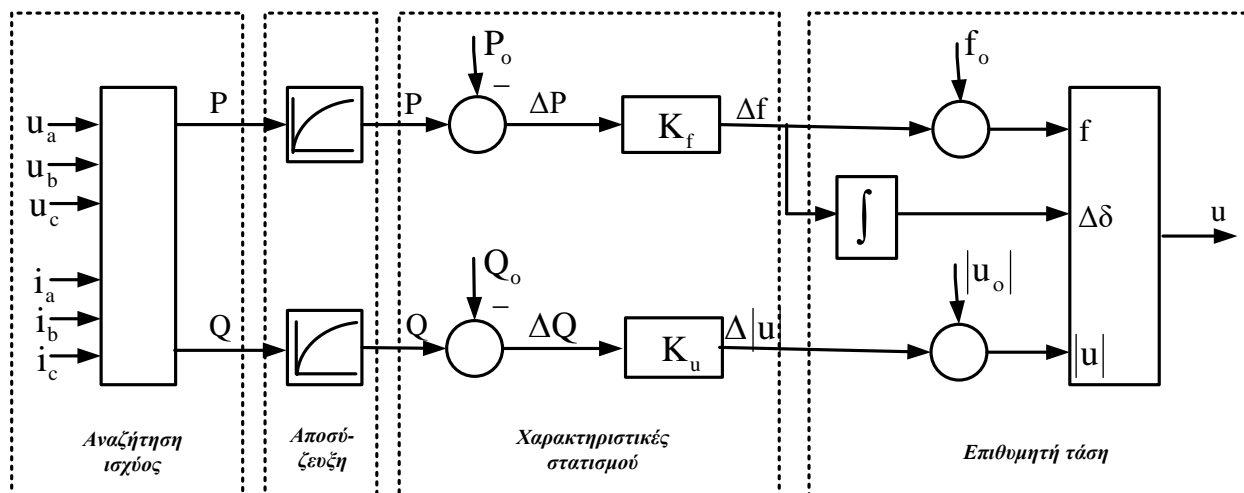
Για την εξισορρόπηση της παραγωγής με τη ζήτηση στα μικροδίκτυα χρειάζεται μία ακριβής κατανομή της πραγματικής παραγωγής στις μικροπαραγωγές. Με τη χρήση ελεγκτών στατισμού υπάρχουν δύο δυνατότητες: $P(f)$ και $f(P)$, δηλαδή να μετρούμαι τη συχνότητα και να ορίζουμε την πραγματική ισχύ ή αντίστροφα. Παρόμοια δυνατότητα ισχύει και για έλεγχο $V(Q)$ ή $Q(V)$.

3.3.3 Εφαρμογή των χαρακτηριστικών στατισμού στον έλεγχο VSI

Είναι δυνατή η απευθείας εφαρμογή των χαρακτηριστικών στατισμού στον έλεγχο VSI, κατά αναλογία με τον τρόπο εφαρμογής τους στις σύγχρονες στρεφόμενες γεννήτριες. Όμως σε μικροδίκτυα με μεγάλο αριθμό μικροπαραγωγών συνδεδεμένων μέσω VSIs δεν είναι εύκολη η ακριβής και συνεχόμενη μέτρηση της στιγμιαίας συχνότητας, ώστε μέσω της χαρακτηριστικής στατισμού να καθορίζεται η απαιτούμενη πραγματική ισχύς του VSI. Είναι ευκολότερη η μέτρηση της πραγματικής ισχύος και ο καθορισμός της συχνότητας του VSI από την καμπύλη στατισμού. Επίσης, επειδή όπως αναφέρθηκε ο έλεγχος σταθερής τάσης δημιουργεί λειτουργικά προβλήματα και πιθανές απαιτήσεις άεργου ισχύος εκτός των δυνατοτήτων των VSIs, είναι πρακτικότερη η μέτρηση της άεργης ισχύος και ο καθορισμός της τάσης εξόδου του VSI από την καμπύλη στατισμού. Για αρνητική κλίση K των χαρακτηριστικών στατισμού και p_u τιμές των μεταβλητών, οι υπολογισμοί γίνονται από τις εξισώσεις:

$$\Delta f = K_f \Delta P \quad \text{και} \quad \Delta |u| = K_u \Delta Q \quad (3.3)$$

όπου το Δ εκφράζει τη μεταβολή της μεταβλητής από την τιμή αναφορά της.



Σχ. 3.3 Στρατηγική ελέγχου βασισμένη στη μέτρηση ισχύων.

Στο Σχ. 3.3 δείχνεται το παραστατικό διάγραμμα του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου. Από τις στιγμιαίες τιμές της EP τριφασικής τάσης και ρεύματος στο ορθογώνιο «αναζήτηση ισχύος» υπολογίζονται οι τιμές της πραγματικής, P και άεργου, Q ισχύος. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μίας πρώτης τάξης καθυστέρηση, στο ορθογώνιο «αποσύζευξη», για να επιτύχουμε αποσύζευξη των δύο βρόχων ελέγχου. Αυτή η καθυστέρηση μπορεί να εισαχθεί και μέσω των φίλτρων μέτρησης των ισχύων. Επίσης αυτή η καθυστέρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό του χρόνου μέσα στον οποίο αλλάζουν η συχνότητα και η τάση του VSI σε σχέση με τις αλλαγές των ισχύων. Στη συνέχεια έχουμε την εφαρμογή των ελέγχων στατισμού, στο ορθογώνιο «χαρακτηριστικές στατισμού», όπου η πραγματική ισχύς προσδιορίζει τη συχνότητα και η άεργος ισχύς προσδιορίζει το μέτρο της τάσης. Επίσης, για τη βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος εισάγεται μία διόρθωση της φασικής γωνίας της τάσης, από το χρονικό ολοκλήρωμα της διακύμανσης της συχνότητας. Έτσι στο τελικό ορθογώνιο «επιθυμητή τάση» προσδιορίζεται η επιθυμητή τάση εξόδου του VSI.

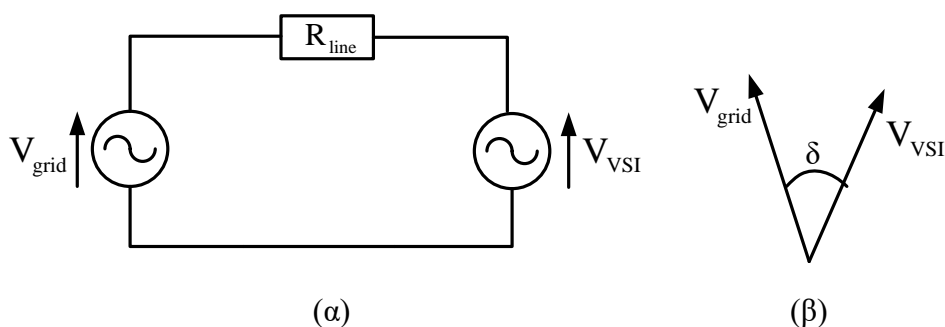
3.3.4 Επίδραση των παραμέτρων της γραμμής στον ελεγκτή VSI με χαρακτηριστικές στατισμού

Στον Πίνακα 3.1 δίνονται τυπικές τιμές για τις παραμέτρους γραμμών, R , X και ονομαστικά ρεύματα, για γραμμές YT, MT και XT. Από τον πίνακα αυτόν προκύπτει ότι ο επαγωγικός χαρακτήρας (δηλαδή μεγάλος λόγος επαγωγικής προς ωμική αντίσταση) των γραμμών ισχύει μόνο για τις γραμμές YT. Η υπόθεση αυτή δεν ισχύει για γραμμές MT, ενώ για γραμμές XT ισχύει ακριβώς το αντίθετο, δη-

Πίνακας 3.1 Τυπικές παράμετροι γραμμών

Τύπος γραμμών	R (Ω/Km)	X (Ω/Km)	I _N (A)	X/R
XT	0.642	0.083	142	0.129
MT	0.161	0.190	396	1.180
YT	0.060	0.191	580	3.180

λαδή επικρατεί ο ωμικός χαρακτήρας των γραμμών. Συνεπώς, η υπόθεση για επαγωγική σύζευξη πηγών τάσης (VSI), που κάναμε στην προηγούμενη παράγραφο για τον έλεγχο των VSIs με τις χαρακτηριστικές στατισμού, ισχύει μόνο για γραμμές YT. Για γραμμές XT, δεχόμενοι το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 3.4, όπου ένας VSI συνδέεται στο δίκτυο (grid) μέσω αντίστασης, ισχύουν οι εξισώσεις:



Σχ. 3.4 VSI συζευγμένος ωμικά: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα. (β) Διάγραμμα παραστατικών μιγάδων.

$$Q_{VSI} = \frac{|V_{VSI}| |V_{grid}|}{R_{line}} \sin \delta \quad (3.3)$$

$$P_{VSI} = \frac{|V_{VSI}|^2}{R_{line}} - \frac{|V_{VSI}| |V_{grid}|}{R_{line}} \cos \delta \quad (3.4)$$

Οι εξ. 3.3 και 3.4 αποδεικνύουν ότι στα δίκτυα διανομής (XT) η φασική διαφορά των τάσεων (δ) καθορίζει τη ροή άεργου ισχύος, ενώ η διαφορά των μέτρων των τάσεων ($|V_{VSI}| - |V_{grid}| \cos \delta$) καθορίζει τη ροή πραγματικής ισχύος. Το πιθανό συμπέρασμα από την προηγούμενη παρατήρηση είναι ότι για γραμμή XT καταλληλότερες χαρακτηριστικές στατισμού είναι οι πραγματικής ισχύος/τάσης και άεργου ισχύος/συχνότητας, που θα ονομάζονται στη συνέχεια «χαρακτηριστικές αντίστροφου στατισμού», σε αντιδιαστολή με τις χρησιμοποιηθείσες «χαρακτηριστικές συμβατικού στατισμού».

Όμως η χρήση της πραγματικής ισχύος για τον έλεγχο της τάσης θα είχε σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις, γιατί θα άλλαζε τελείως την έννοια της οικονομικής κατανομής φορτίου στις παραγωγές. Επίσης θα χανόταν η συμβατότητα των στρεφόμενων γεννητριών στη ΧΤ με τις αντίστοιχες γεννήτριες του κύριου δικτύου. Ο σκοπός του ελέγχου άεργου ισχύος/τάσης είναι να περιορίζει τις ροές άεργου ισχύος στο δίκτυο ΧΤ. Η διατήρηση της τάσης εντός προδιαγραφών επιτυγχάνεται με κατάλληλη χωροταξική διεύθετηση των γραμμών ΧΤ και στην ουσία με τη λήψη μέτρων που αυξάνουν την επαγωγή των γραμμών, π.χ. με προσθήκη επαγωγών (chokes).

Στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από τη χρήση του συμβατικού ή αντίστροφου στατισμού στα δίκτυα ΧΤ. Από τον πίνακα

Πίνακας 3.2 Σύγκριση συμβατικού και αντίστροφου στατισμού σε δίκτυα ΧΤ

	Συμβατικός στατισμός	Αντίστροφος στατισμός
Συμβατότητα με δίκτυα ΥΤ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
Συμβατότητα με στρεφόμενες γεννήτριες	ΝΑΙ	ΟΧΙ
Απευθείας έλεγχος τάσης	ΟΧΙ	ΝΑΙ
Κατανομή πραγματικής ισχύος	ΝΑΙ	ΟΧΙ

αυτόν προκύπτει ότι το μόνο πλεονέκτημα από τη χρήση του αντίστροφου στατισμού είναι ο απευθείας έλεγχος της τάσης. Όμως αν ελέγχονταν με αυτόν τον τρόπο η τάση, δεν θα ήταν δυνατή η κατανομή της πραγματικής ισχύος στις μικροπαραγωγές. Κάθε φορτίο θα τροφοδοτούνταν από την πλησιέστερη μικροπαραγωγή. Επειδή αυτό γενικά δεν είναι δυνατόν, οι διακυμάνσεις της τάσης θα παρέμεναν κατά μήκος του δικτύου. Με το συμβατικό στατισμό επιτυγχάνουμε συμβατότητα με το κύριο δίκτυο και συμβατότητα μεταξύ των στρεφόμενων γεννητριών, ενώ έχουμε και επιτυχή κατανομή της πραγματικής ισχύος στις μικροπαραγωγές. Αλλά και οι διακυμάνσεις της τάσης κατά μήκος του δικτύου καθορίζονται από τη χωροταξική διεύθετηση των γραμμών, που σήμερα είναι τυποποιημένη.

Αποδεικνύεται ότι με το συμβατικό στατισμό έχουμε ευσταθή λειτουργία και μπορεί να εφαρμοσθεί και στα δίκτυα ΧΤ, παρόλο που σε αυτά η άεργη ισχύς εξαρτάται κυρίως από τη φασική γωνία των τάσεων (εξ. 3.3) και έχουμε ισχυρή σύζευξη μεταξύ των δύο βρόχων ελέγχου. Φυσικά οι δύο βρόγχοι ελέγχου πρέπει να συνεργάζονται και η ευστάθειά τους εξαρτάται από την κλίση των χαρακτηριστικών στατισμού. Στην πράξη όμως για να έχουμε αποτελεσματική λειτουργία πρέπει κάπως να τροποποιήσουμε τη συμπεριφορά των VSIs και να οδηγηθούμε σε απόκριση του συστήματος με VSIs συζευγμένους επαγωγικά. Με

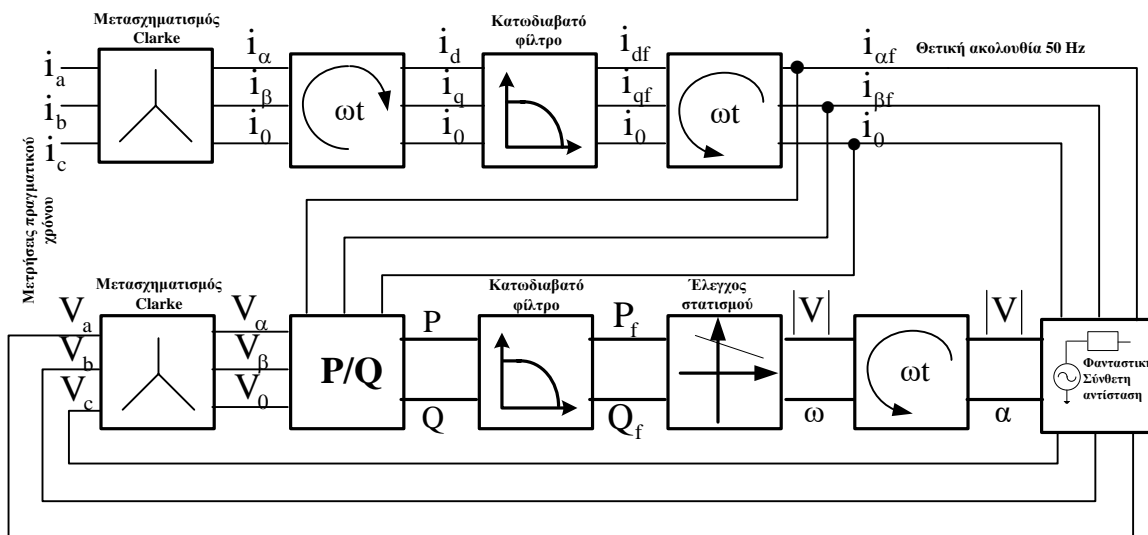
άλλα λόγια πρέπει να αντιμετωπίσουμε την εξάρτηση της αποτελεσματικότητας του ελέγχου των VSIs από τη σύνθετη αντίσταση (impedance) της γραμμής. Για να γίνει αυτό, η μέθοδος της «φανταστικής σύνθετης αντίστασης» (fictitious impedance method) προτείνει την εισαγωγή μίας πλασματικής (φανταστικής) σύνθετης αντίστασης στην έξοδο ελέγχου των VSIs, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

3.3.5 Βελτίωση της ευστάθειας με χρήση της φανταστικής σύνθετης αντίστασης

Με τη μέθοδο αυτή προστίθεται μία πτώση τάσης στην επιθυμητή τάση του VSI, που δημιουργείται από το σύστημα ελέγχου του Σχ. 3.3 και η νέα τάση είναι η επιθυμητή τάση του VSI. Η πτώση τάσης δημιουργείται από την εφαρμογή των ρευμάτων του VSI στη φανταστική σύνθετη αντίσταση. Οι τιμές της φανταστικής σύνθετης αντίστασης εξαρτώνται από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του δικτύου και την επιθυμητή λειτουργική απόκριση του VSI. Με τη ρύθμιση αυτών των τιμών έχουμε ένα ευέλικτο τρόπο προσαρμογής του VSI στο δίκτυο και ουσιαστικά επιτυγχάνουμε την αποσύζευξη των βρόχων ελέγχου P/f και Q/V. Η φανταστική σύνθετη αντίσταση είναι μία πρόσθετη μεταβλητή ελέγχου, που το μέτρο και η γωνία της μπορούν να πάρουν οποιοσδήποτε επιθυμητές τιμές, χωρίς να συμβάλουν στις απώλειες του VSI, αφού η φανταστική σύνθετη αντίσταση εισάγεται μόνο για την εξυπηρέτηση του ελέγχου (στην ψηφιακή πραγματοποίηση του ελέγχου είναι ένας μιγαδικός πολλαπλασιαστής). Ενδεικτικές τιμές αυτής της αντίστασης είναι 0.5-3 Ω (ένα μικρό μέρος αυτής είναι ωμικό), για ονομαστική ισχύ VSI 10 KW.

Ένα γενικό διάγραμμα του προτεινόμενου ελέγχου δείχνεται στο Σχ. 3.5. Για να αποφύγουμε τις αρμονικές και τις ασυμμετρίες των ρευμάτων και των τάσεων, τα ρεύματα φιλτράρονται και χρησιμοποιείται μόνο η θετική ακολουθία τους, ενώ για τις τάσεις χρησιμοποιούνται οι επιθυμητές τιμές τάσεις που δημιουργεί το σύστημα ελέγχου. Ακολουθεί η περιγραφή του Σχ. 3.5 με περισσότερες λεπτομέρειες:

1. Τα ρεύματα (i_a, i_b, i_c) μετρούνται με δειγματοληψία πραγματικού χρόνου και οι τάσεις (V_a, V_b, V_c) λαμβάνονται από τις τιμές που υπολογίζουμε στην έξοδο του ελέγχου.
2. Χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Clarke για να πάρουμε τα ρεύματα (i_α, i_β και i_0) και τις τάσεις (V_α, V_β και V_0) σε διανυσματική μορφή.



Σχ. 3.5 Γενικό διάγραμμα ελέγχου με χρήση φανταστικής σύνθετης αντίστασης

3. Σε αυτήν τη μορφή τα ρεύματα έχουν αρμονικές και είναι ασύμμετρα, οπότε χρησιμοποιείται ένα σύγχρονα στρεφόμενο σύστημα αναφοράς για να πάρουμε την απευθείας (direct), ορθογώνια (quadrature) και μηδενική (zero) συνιστώσες ρεύματος (i_d , i_q και i_0). Σε αυτό το σύστημα αναφοράς μόνο η θετική ακολουθία του ρεύματος είναι σταθερή.
4. Χρησιμοποιείται ένα κατωδιαβατό φίλτρο (συνήθης συχνότητα αποκοπής 5-30 Hz, λίγο μικρότερη είναι για το φίλτρο ισχύων) για να αποκόψουμε όλες τις συχνότητες πάνω από 100 Hz, οπότε μένουν μόνο τα ρεύματα θετικής ακολουθίας (i_{df} , i_{qf}).
5. Με το σύγχρονο σύστημα αναφοράς μετασχηματίζουμε αντίστροφα για να πάρουμε τη διανυσματική παράσταση των ρευμάτων στη θεμελιώδη συχνότητα ($i_{\alpha f}$, $i_{\beta f}$).
6. Η πραγματική και η άεργος ισχύς (P και Q) υπολογίζονται με χρήση των ρευμάτων και των τάσεων σε διανυσματική μορφή.
7. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η στρατηγική ελέγχου που παρουσιάζεται στο Σχ. 3.3. Ένα κατωδιαβατό φίλτρο προσδιορίζει την ταχύτητα απόκρισης του ελέγχου και του δίνει χαρακτηριστικά αντίστοιχα με τον έλεγχο στρεφόμενων μηχανών, που παρουσιάζει χρονική καθυστέρηση, λόγω της μηχανικής αδράνειας των μηχανών. Στην έξοδο του φίλτρου παίρνουμε τα P_f και Q_f .
8. Ο έλεγχος στατισμού καθορίζει το μέτρο και τη συχνότητα της επιθυμητής τάσης εξόδου του VSI.
9. Η επιθυμητή τάση του VSI προκύπτει από το μέτρο, τη συχνότητα και τη φασική γωνία της τάσης.

10. Τέλος εφαρμόζεται η μέθοδος της φανταστικής σύνθετης αντίστασης, που προσθέτει την περιγραφείσα πτώση τάσης στην επιθυμητή τάση του VSI, για να προκύψει η τελική επιθυμητή τάση του.

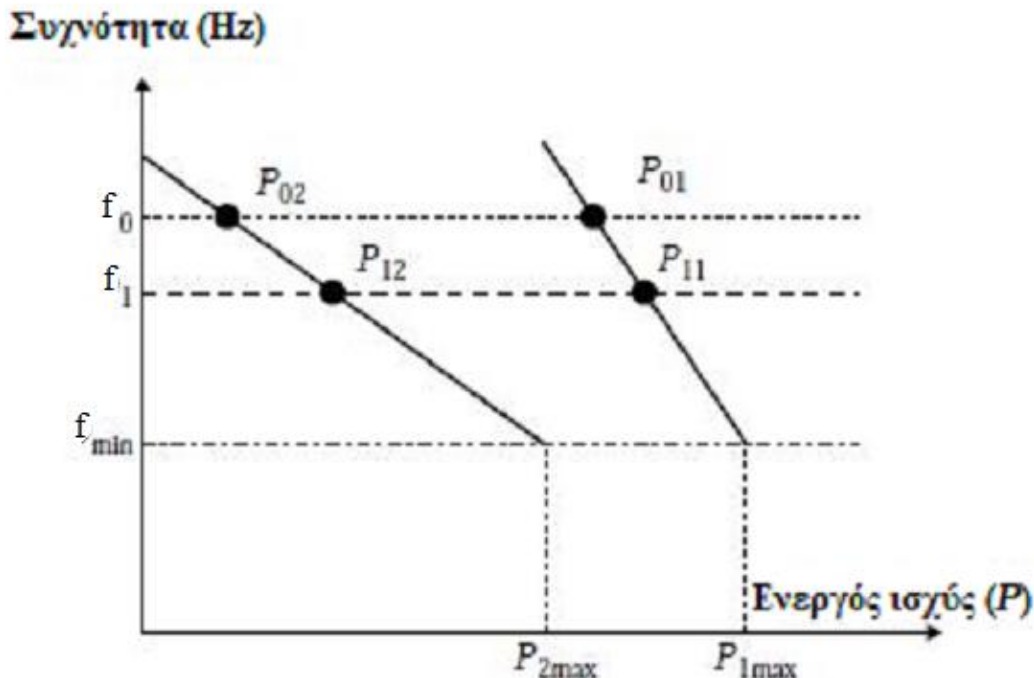
Η χρονική αντίδραση και η απόκριση συχνότητας του ψηφιακού φίλτρου των ισχύων προσομοιώνει την καθυστέρηση απόκρισης των συμβατικών στρεφόμενων μηχανών, λόγω της αδράνειας της μάζας του δρομέα τους. Μία αργή απόκριση του φίλτρου παρέχει στο VSI χαρακτηριστικά παρόμοια με τις μηχανές με βαρύ δρομέα, που έχουν αργή απόκριση και αμελητέες μεταβολές ισχύος υψηλής συχνότητας. Αντίστροφη είναι η συμπεριφορά του VSI για γρήγορη απόκριση του φίλτρου. Συνήθως οι αργές γεννήτριες απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της μεταβολής του φορτίου.

Το μέτρο της φανταστικής σύνθετης αντίστασης συνήθως επιλέγεται μεγαλύτερο από το μέτρο της σύνθετης αντίστασης των φίλτρων, ώστε να επικρατεί στη συνολική σύνθετη αντίσταση εξόδου του VSI. Μία επαγωγική φανταστική σύνθετη αντίσταση μπορεί να αλλάξει την απόκριση ενός δικτύου XT, στο οποίο επικρατεί η ωμική αντίσταση και να βελτιώσει την ευστάθειά του. Το ωμικό τμήμα της φανταστικής σύνθετης αντίστασης χρησιμοποιείται για την απόσβεση των ταλαντώσεων μεγάλης συχνότητας, που εμφανίζονται όταν έχουμε επαγωγική σύζευξη των VSIs. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναλογική (σε σχέση με την ονομαστική τους ισχύ) κατανομή των ασύμμετρων ρευμάτων και αρμονικών στους VSIs.

Επιλέγοντας το μέτρο της φανταστικής σύνθετης αντίστασης αντίστροφα ανάλογα με την ονομαστική ισχύ των VSIs, επιτυγχάνουμε αυτόματη κατανομή των ρευμάτων τους ανάλογα με την ισχύ τους στη μεταβατική και μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τους.

3.3.6 Κατανομή φορτίου μέσω P-f ελέγχου και δευτερογενής έλεγχος

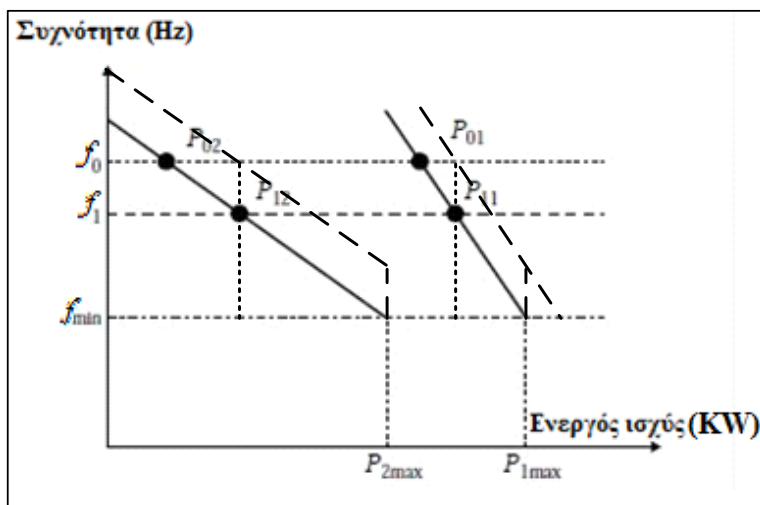
Οι ελεγκτές του μικροδίκτυου εξασφαλίζουν αυτόματη και ομαλή μεταγωγή από την αυτόνομη στη διασυνδεδεμένη λειτουργία και αντίστροφα, ανάλογα με τις ανάγκες του μικροδίκτυου. Κατά τη μετάβαση σε αυτόνομη λειτουργία, ο MC κάθε μικροπαραγωγής εκτελεί τοπικό έλεγχο P-f αλλάζοντας το σημείο λειτουργίας, έτσι ώστε να επιτευχθεί ισορροπία ισχύος στη νέα φόρτιση. Η λειτουργία αυτή του MC πραγματοποιείται αυτόνομα ύστερα από κατάλληλη παρακολούθηση του φορτίου, χωρίς προηγούμενη εντολή από τον CC ή γειτονικούς MCs. Στο Σχ. 3.6 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές στατισμού P-f των MCs για τον έλεγχο δύο μικροπαραγωγών.



Σχ. 3.6 Χαρακτηριστική στατισμού για P - f ελεγκτή.

Στη διασυνδεδεμένη λειτουργία του μικροδίκτυου τα φορτία του τροφοδοτούνται και από τις μικροπαραγωγές και από το δίκτυο, ανάλογα με τις ανάγκες του καταναλωτή. Όμως κατά τη μετάβαση σε αυτόνομη λειτουργία, εξαιτίας κάποιου σφάλματος στο κύριο δίκτυο, ή κατά την αυτόνομη λειτουργία και αλλαγή του φορτίου, μεταβάλλεται η γωνία φάσης των τάσεων EP των VSIs, οδηγώντας σε μεταβολή της ισχύος εξόδου τους. Έτσι, η συχνότητα μεταβάλλεται τοπικά και κάθε μικροπαραγωγή αναλαμβάνει το φορτίο που της αναλογεί, χωρίς καμία εντολή ρύθμισης από τον CC. Αναφερόμενοι για παράδειγμα στο Σχ. 3.6, έστω ότι στην αυτόνομη λειτουργία το μικροδίκτυο έχει την ονομαστική συχνότητα f_0 , οπότε οι δύο μικροπαραγωγές αποδίδουν τις ισχύεις P_{01} και P_{02} . Αν έχουμε μία αύξηση φορτίου, αυτή αλλάζει τις συχνότητες στην έξοδο των VSIs, η διαφορά των συχνοτήτων αλλάζει τη γωνία ισχύος μεταξύ τους και αυτό οδηγεί σε μία μικρότερη κοινή συχνότητα λειτουργίας f_1 και οι νέες κατανομές ισχύος γίνονται P_{11} και P_{12} .

Επειδή ο έλεγχος στατισμού μετά από κάθε μεταβολή του φορτίου οδηγεί σε συχνότητα λειτουργίας διαφορετική της ονομαστικής, ο MC πρέπει να ενσωματώνει ένα επιπλέον έλεγχο, που θα επαναφέρει την ονομαστική συχνότητα στο μικροδίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση ο δευτερογενής έλεγχος μετακινεί οριζόντια την καμπύλη στατισμού (Σχ. 3.7), ώστε να παράγεται η ίδια πραγματική ισχύς, αλλά με ονομαστική συχνότητα.



Σχ. 3.7 Δευτερογενής έλεγχος για αποκατάσταση της ονομαστικής συχνότητας.

3.3.7 Βοηθητικές υπηρεσίες μικροδίκτυου

Όταν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο, μπορεί να συμβάλει στην προσπάθεια συνολικού ελέγχου του δικτύου προσφέροντας βοηθητικές υπηρεσίες (ancillary services) και με αυτόν τον τρόπο να διευκολύνει τη λειτουργία του συστήματος.

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να ενισχύσει την τάση του ζυγού στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC), σε περιπτώσεις διαταραχών που προκαλούν βύθιση της τάσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένα μικροδίκτυο με δυνατότητα ελέγχου της τάσης τροφοδοτεί την κατάλληλη ποσότητα άεργου ισχύος για να διατηρεί την τάση εντός προδιαγραφών. Ο κεντρικός ελεγκτής (CC) ρυθμίζει τις παραμέτρους των χαρακτηριστικών στατισμού Q/V των VSIs των μικροπαραγών, ώστε αυτές να μοιράζονται τις απαιτήσεις άεργου ισχύος του μικροδίκτυου και της τροφοδοτούμενης/απορροφούμενης άεργου ισχύος από το κύριο δίκτυο. Αυτή η άεργος ισχύς είναι μηδέν κατά την απομονωμένη λειτουργία και οι VSIs παράγουν την απαραίτητη ισχύ για να διατηρούν την τάση του μικροδίκτυου εντός προδιαγραφών.

Επίσης ένα μικροδίκτυο μπορεί να τροφοδοτεί/απορροφά ένα συγκεκριμένο ποσό πραγματικής ισχύος από το κύριο δίκτυο στο PCC. Αυτό γίνεται με ρύθμιση της θέσης των καμπυλών στατισμού P/f των VSIs από τον CC.

Προφανώς κάθε μικροπαραγωγή έχει ιδιαίτερα δυναμικά χαρακτηριστικά απόκρισης, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή των προαναφερθέντων ελέγχων.

3.3.8 Απαιτήσεις αποθήκευσης για γρήγορη ικανοποίηση φορτίου

Για διασυνδεδεμένα μικροδίκτυα, η αρχική ισορροπία ισχύος κατά τη σύνδεση νέων φορτίων παρέχεται από την κινητική ενέργεια των κινούμενων μερών των γεννητριών του δικτύου. Όμως κατά την αυτόνομη λειτουργία του μικροδίκτυου, το μικροδίκτυο πρέπει να διασφαλίσει την αρχική ισορροπία ισχύος μέσω των συστημάτων αποθήκευσης. Οι συσκευές αποθήκευσης ΣΡ συνδέονται στον ζυγό ΣΡ της μικροπαραγωγής, ενώ οι συσκευές αποθήκευσης ΕΡ συνδέονται απευθείας στο ζυγό του μικροδίκτυου. Ο ΜC εξασφαλίζει κατάλληλη αξιοποίηση των συσκευών αποθήκευσης για γρήγορη ικανοποίηση του φορτίου.

3.4 ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ (Central Controller (CC))

Ο CC αποτελείται από δύο μονάδες:

- Μονάδα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Module (EMM))
- Μονάδα συντονισμού προστασίας (Protection Co-ordination Module (PCM))

3.4.1 Μονάδα διαχείρισης ενέργειας (EMM)

Η EMM παρέχει τις βασικές λειτουργίες ελέγχου για τη βέλτιστη οικονομική λειτουργία του μικροδίκτυου. Εδώ παρουσιάζεται μια απλή EMM που περιλαμβάνει βασικούς ελέγχους για την ικανοποιητική λειτουργία του μικροδίκτυου. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των λειτουργιών ελέγχου, τόσο πιο εξελιγμένος και λεπτομερής γίνεται ο έλεγχος, με αύξηση όμως της πολυπλοκότητας στο σχεδιασμό.

3.4.1.1 Βασικές λειτουργίες ελέγχου του μικροδίκτυου.

Μια απλή EMM καθορίζει μόνο τα σημεία αναφοράς (set points) για την πραγματική ισχύ και την τάση των ΜCs, ενώ ο βασικός έλεγχος των μικροπαραγωγών πραγματοποιείται μόνο μέσω των ΜCs τους. Τα σημεία αναφοράς για την πραγματική ισχύ των μικροπαραγωγών εξαρτώνται από την οικονομική εκτίμηση του κόστους καυσίμου, του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας, τις καιρικές συνθήκες και τις αναμενόμενες λειτουργικές απαιτήσεις. Το σημείο αναφοράς της τάσης διατηρείται σε μια καθορισμένη περιοχή για να εξασφαλιστεί κατάλληλη ρύθμιση της τάσης του μικροδίκτυου.

Αναλυτικότερα οι βασικές λειτουργίες είναι:

Έλεγχος τάσης.

Τα φορτία του μικροδίκτυου και οι συντελεστές ισχύος τους ελέγχονται μεταβάλλοντας το μέτρο και τη γωνία φάσης της τάσης των μικροπαραγωγών. Οι τοπικοί έλεγχοι τάσης και συντελεστή ισχύος των μικροπαραγωγών πραγματοποιούνται μέσω των MCs και όχι μέσω της EMM. Η EMM παρέχει μόνο τα σημεία αναφοράς της τάσης για προκαθορισμένους σημαντικούς ζυγούς του μικροδίκτυου. Όταν οι γραμμές διανομής δεν είναι πλήρως φορτισμένες στο μικροδίκτυο, υπάρχει μία τάση να αυξηθεί η τάση τους. Για να ανιχνευθεί αυτή η τάση αύξησης, οι MCs παρακολουθούν συνεχώς την τοπική τάση και την ανατροφοδοτούν στην EMM. Στη συνέχεια η EMM παρέχει τα κατάλληλα σημεία αναφοράς στους MCs ώστε να πραγματοποιηθεί η απαιτούμενη ρύθμιση της τάσης. Ο σκοπός της στρατηγικής αυτής είναι να κάνει το μικροδίκτυο να φαίνεται από την πλευρά του δικτύου ως ένα ενιαίο σύνολο ελεγχόμενων μικροπαραγωγών και φορτίων, που λειτουργούν ως μία ελεγχόμενη μονάδα με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Έλεγχος συντελεστή ισχύος.

Οι μικροπαραγωγές δεν έχουν ενσωματωμένο έλεγχο του συντελεστή ισχύος τους. Επειδή ο συντελεστής ισχύος εξαρτάται από το φορτίο, όλοι οι MCs περιλαμβάνουν τον έλεγχο του συντελεστή ισχύος ως μέρος της λειτουργίας τους για ικανοποίηση του φορτίου. Ωστόσο, κάποια συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος σύνδεσης των μικροπαραγωγών διαθέτουν έλεγχο του συντελεστή ισχύος, για να ελέγξουν τη φασική γωνία του τροφοδοτούμενου ρεύματος και να ελαχιστοποιήσουν την αρμονική παραμόρφωση. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο έλεγχος του συντελεστή ισχύος πραγματοποιείται μέσω του MC κάθε μικροπαραγωγής, χωρίς να απαιτείται κάποια εντολή από την EMM εκτός από την τάση αναφοράς.

Έλεγχος στροφών κινητήριας μηχανής.

Αυτός ο έλεγχος εφαρμόζεται σε μικροπαραγωγές με κινούμενα μέρη, όπως μικροστρόβιλοι και ανεμογεννήτριες. Για να εξυπηρετηθεί η μεταβολή του φορτίου εντός της ονομαστικής ισχύος του μικροδίκτυου, η κινητήρια μηχανή της μικροπαραγωγής πρέπει να αλλάζει την ταχύτητά της ώστε να επιτύχει ισορροπία ισχύος για το καινούργιο φορτίο. Για να γίνει αυτό σε μία κινητήρια μηχανή σταθερής ταχύτητας πρέπει να αλλάξει η εισαγωγή καυσίμου της. Αυτό όμως θα επηρεάσει ξανά την απόδοση της κινητήριας μηχανής, επειδή η απόδοσή της είναι

συνάρτηση της ταχύτητάς της και της εισαγωγής καυσίμου. Έτσι, ο έλεγχος της ταχύτητας της κινητήριας μηχανής πρέπει να εξασφαλίζει ότι η παραγωγή ισχύος γίνεται στη βέλτιστη απόδοση της μικροπαραγωγής. Αυτός ο έλεγχος πραγματοποιείται από τον MC κάθε μικροπαραγωγής, για να απλοποιήσουμε κατά το δυνατόν τη σχεδίαση της EMM.

Ρύθμιση της συχνότητας.

Σε συμβατικά συστήματα ισχύος, η συχνότητα της παραγόμενης τάσης εξαρτάται από την ταχύτητα των σύγχρονων γεννητριών. Αντίθετα, στα μικροδίκτυα οι μικροπαραγωγές δύνανται να παράγουν ισχύ σε οποιαδήποτε επιθυμητή συχνότητα με τη βοήθεια των μετατροπέων τους που ελέγχονται από τους MCs. Κατά τη διασυνδεδεμένη λειτουργία του μικροδίκτυου δεν χρειάζεται να πραγματοποιείται P-f έλεγχος από τον MC κάθε μικροπαραγωγής, γιατί οι μεταβολές της συχνότητας ρυθμίζονται από το δίκτυο. Στην αυτόνομη λειτουργία, οι MC εφαρμόζουν αυτόν τον έλεγχο για να διατηρούν σταθερή τη συχνότητα κατά τις μεταβολές του φορτίου. Και στις δύο καταστάσεις λειτουργίας, η EMM δεν παρεμβαίνει στον έλεγχο της συχνότητας των MC. Ωστόσο, στην αυτόνομη λειτουργία, η EMM παρακολουθεί συνεχώς τη συχνότητα του μικροδίκτυου και εάν μία πτώση της συχνότητας δεν αποκατασταθεί μέσα σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, αποσυνδέει φορτία ώστε να επιτευχτεί η ισορροπία ισχύος και να εξασφαλισθεί η ευστάθεια του μικροδίκτυου.

3.4.1.2 Η λειτουργία της EMM σε ένα τυπικό μικροδίκτυο.

Για να είναι απλός ο έλεγχος του μικροδίκτυου, ο αριθμός των λειτουργιών ελέγχου της EMM είναι περιορισμένος. Έτσι ελαχιστοποιείται ο αριθμός των σημάτων ανάδρασης από τους MCs στην EMM, που απαιτούνται για την αποστολή των απαραίτητων εντολών στις μικροπαραγωγές.

Διασυνδεδεμένη λειτουργία.

Στη διασυνδεδεμένη λειτουργία, τα σήματα ελέγχου της EMM περιορίζονται στην αποστολή των τιμών αναφοράς της πραγματικής ισχύος και της τάσης των μικροπαραγωγών. Ο τοπικός έλεγχος της τάσης και του συντελεστή ισχύος που πραγματοποιείται από τους MCs κάνει το μικροδίκτυο να φαίνεται στο δίκτυο ως ένα ελέγξιμο φορτίο που λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Έτσι, η EMM δεν εφαρμόζει επιπρόσθετο έλεγχο τάσης, ο οποίος ίσως να διατάραζε την λειτουργία των ρυθμιστών τάσης και των πυκνωτών αντιστάθμισης του δικτύου ή

τους MCs του μικροδίκτυου. Εάν οι τροφοδότες του μικροδίκτυου είναι ελαφρά φορτισμένοι και έχουμε αύξηση της τάσης, αυτή αντιμετωπίζεται από τους ελεγκτές του δικτύου. Όμως η EMM καθορίζει τον έλεγχο της τάσης κάποιων μικροπαραγωγών για να ελέγξει την τάση σε συγκεκριμένους κρίσιμης σημασίας ζυγούς του μικροδίκτυου.

Αυτόνομη λειτουργία.

Κατά την αυτόνομη λειτουργία ο κύριος σκοπός της EMM είναι να παρέχει τις τιμές αναφοράς για την τάση και την πραγματική ισχύ των MCs. Η συχνότητα και η ροή άεργης ισχύος ελέγχεται αυτόνομα από τους MCs μέσω των χαρακτηριστικών στατισμού P-f και Q-V. Η EMM δεν στέλνει κανένα σήμα για τον έλεγχο της συχνότητας και της φασικής γωνίας στους MCs. Ωστόσο, παρακολουθεί τη συχνότητα του μικροδίκτυου και πραγματοποιεί αποσύνδεση φορτίων μέσω των MCs για να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του συστήματος, αν δεν αποκατασταθεί η ονομαστική συχνότητα μέσα σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Στην αυτόνομη λειτουργία αυτές οι λειτουργίες ελέγχου αποκρίνονται γρήγορα, ώστε να επιτευχθεί ισορροπία παραγωγής-φορτίου όσο γίνεται γρηγορότερα, επειδή το μικροδίκτυο δεν είναι το ίδιο ευσταθές με το κύριο δίκτυο σε σχέση με τις δυνατότητες παραγωγής.

Έλεγχος των θερμικών φορτίων.

Για CHP μικροπαραγωγές, τα θερμικά φορτία έχουν προτεραιότητα σε σχέση με τα ηλεκτρικά φορτία. Έτσι, η στρατηγική ελέγχου της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος CHP παραγωγών καθορίζεται κυρίως από τις απαιτήσεις των θερμικών φορτίων των καταναλωτών. Σε συγκεκριμένες εφαρμογές συμπαραγωγής όμως, τα ηλεκτρικά φορτία έχουν προτεραιότητα. Η EMM στην πράξη ρυθμίζει το συντελεστή προτεραιότητας ως προς τη σχετική σημασία των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων.

Ενεργειακή βελτιστοποίηση με μέγιστη απόδοση.

Όταν τα μικροδίκτυα είναι διασυνδεδεμένα σε κοινοπραξίες ισχύος, οι EMMs γειτονικών μικροδίκτυων πρέπει να ενσωματώνουν ένα έλεγχο για την ενεργειακή βελτιστοποίηση του συνολικού διασυνδεδεμένου συστήματος. Σε συνθήκες ελαφριάς φόρτισης, οι EMMs θα πρέπει να εξασφαλίζουν τη λειτουργία του βέλτιστου αριθμού μικροπαραγωγών (ιδιαίτερα των μικροστρόβιλων) στην ονομαστική τους ισχύ, αντί της λειτουργίας όλων των μικροπαραγωγών με ισχύ μικρότερης της ονομαστικής, για να επιτύχουμε βέλτιστη απόδοση. Αυτός ο

έλεγχος πραγματοποιείται καλύτερα από τις EMMs γιατί γνωρίζουν τις λειτουργικές συνθήκες, τις καιρικές παραμέτρους, το πρόγραμμα παραγωγής των μικροπαραγωγών και των πληροφοριών για το καύσιμο, όπως κόστος, διαθεσιμότητα και ρυθμός κατανάλωσης.

Διαχείριση της διαδικασίας αποθήκευσης ενέργειας.

Για διασυνδεδεμένα μικροδίκτυα, οι EMMs ελέγχουν τα φορτία χαμηλής προτεραιότητας αποσυνδέοντάς τα όποτε είναι απαραίτητο. Έτσι χρησιμοποιούν αυτά τα φορτία εμμέσως ως μακροπρόθεσμη ενεργειακή εφεδρεία μέσα στο μικροδίκτυο. Οι συσκευές αποθήκευσης τροφοδοτούν μόνο τις βραχυπρόθεσμες (συνήθως λιγότερο από ένα λεπτό) απαιτήσεις ισχύος, κυρίως για να εξασφαλίζουν αδιάλειπτη παροχή ισχύος στα κρίσιμα φορτία σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Για μακροπρόθεσμες ενεργειακές ανάγκες (δεκάδες λεπτά), οι EMMs αποσυνδέουν τα φορτία χαμηλής προτεραιότητας χωρίς επιβλαβείς επιπτώσεις στα μικροδίκτυα.

Προαιρετικές λειτουργίες ελέγχου για ευφυείς EMM.

Οι ευφυείς EMMs του μέλλοντος θα πρέπει να έχουν μεγάλη ισχύ επεξεργασίας πληροφορίας, ευφυείς διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και επαρκή επικοινωνιακά δίκτυα για επικοινωνία με το γειτονικό εξοπλισμό. Αυτοί οι EMMs πρέπει επίσης να ενσωματώνουν αλγόριθμους ελέγχου που βασίζονται σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence (AI)). Ακόμα, θα πρέπει να περιλαμβάνουν λειτουργίες απομακρυσμένης παρακολούθησης και ελέγχου, ώστε ο εξουσιοδοτημένος χειριστής να λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες για τις παραμέτρους ή τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Επίσης, θα πρέπει να παρέχουν λειτουργία χειροκίνητης παρέμβασης. Οι χειριστές θα έπρεπε να μπορούν να προγραμματίσουν τη βασική λειτουργία και τα σημεία αναφοράς για τις διάφορες διαδικασίες και να εισάγουν τους δικούς τους αλγόριθμους και μοντέλα, ανάλογα με τις απαιτήσεις των καταναλωτών, προσπερνώντας τις λειτουργίες του αυτόματου ελέγχου.

Οι εξελεγμένες EMMs πρέπει να είναι ικανές για διαχείριση πληροφοριών, παρέχοντας οδηγίες λειτουργίας και σημεία αναφοράς στο χειριστή του συστήματος και λαμβάνοντας αυτόνομα αποφάσεις για τη βελτίωση της απόδοσης του συνολικού συστήματος. Επίσης πρέπει να παρακολουθούν την υποβάθμιση του εξοπλισμού και να ανακαλύπτουν λειτουργικά προβλήματα.

Επιπρόσθετα, αυτοί οι EMMs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:

- Παροχή μίας γενικής εποπτείας της διαδικασίας των συστημάτων ελέγχου.
- Εστίαση στην κατανάλωση ενέργειας.
- Ανάλυση των ευκαιριών εξοικονόμησης ενέργειας, ανάλογα με την ώρα της ημέρας, τις συνθήκες της διαδικασίας και τις καιρικές συνθήκες.

Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρικών φορτίων μιας περιοχής και να αξιοποιήσουν αυτά τα δεδομένα για την αξιολόγηση της απόδοσης του θερμικού εξοπλισμού υπό πλήρες και μερικό φορτίο. Από οικονομική άποψη, μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν για να βελτιστοποιήσουν αυτόματα την αξιοποίηση των μικροπαραγωγών και των συστημάτων αποθήκευσης, αξιοποιώντας τιμές αγοράς σε πραγματικό χρόνο για την ηλεκτρική ενέργεια και τα καύσιμα.

3.4.2 Μονάδα συντονισμού προστασίας (Protection Co-ordination Module (PCM))

Η PCM επιβλέπει τη συνολική προστασία για το μικροδίκτυο. Η φιλοσοφία της προστασίας του μικροδίκτυου διαφέρει από αυτήν της προστασίας των συμβατικών δικτύων διανομής, παρόλο που είναι και τα δύο ακτινικά, γιατί:

- Τα μικροδίκτυα περιλαμβάνουν παραγωγές και φορτία με αποτέλεσμα τη ροή ισχύος σε δύο κατευθύνσεις για τις συσκευές προστασίας σε ένα ακτινικό σύστημα.
- Το παθητικό δίκτυο διανομής μετατρέπεται σε ενεργό λόγω της παρουσίας των μικροπαραγωγών και επιδιώκεται η συνέχιση της τροφοδοσίας των κρίσιμων φορτίων.
- Κατά την αλλαγή από τη διασυνδεδεμένη στην αυτόνομη λειτουργία αλλάζει δραστικά η αντοχή σε βραχυκύκλωμα του μικροδίκτυου. Αυτό έχει σημαντική επίδραση στους συμβατικούς ηλεκτρονόμους υπερέντασης, οι οποίοι λειτουργούν βασιζόμενοι στις τιμές του ρεύματος βραχυκυκλώματος.

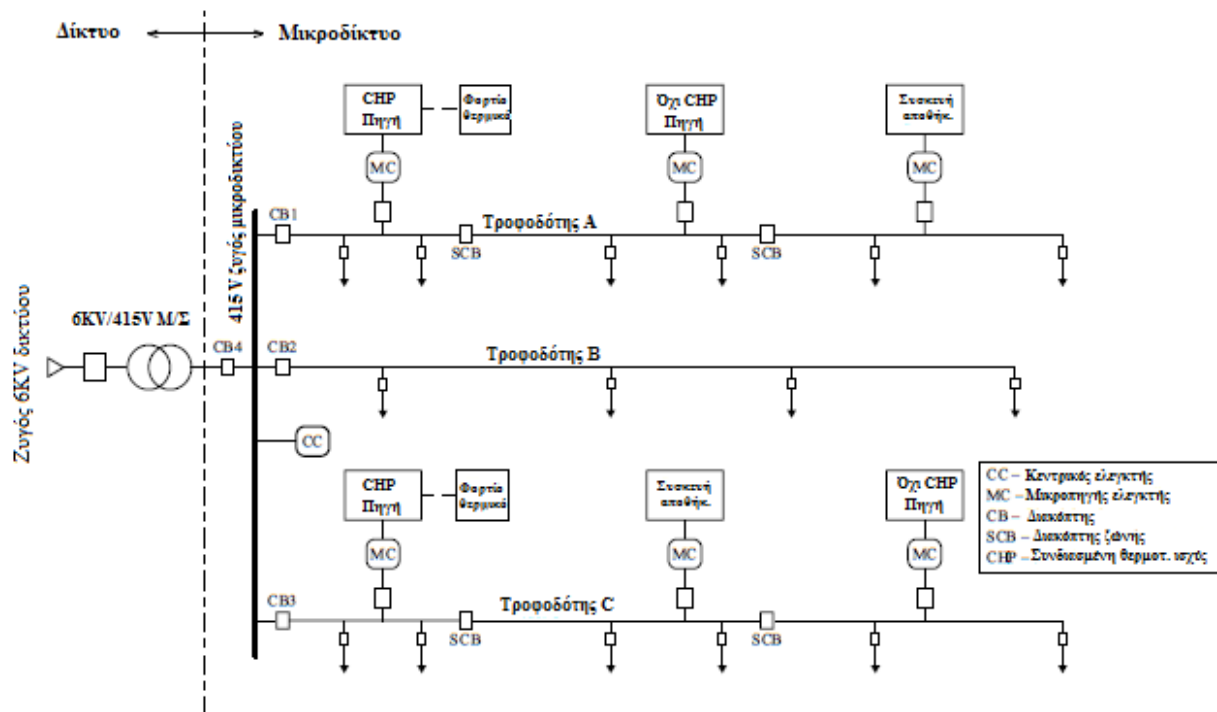
Το βασικό χαρακτηριστικό της PCM είναι να ξεχωρίζει τις απαιτήσεις προστασίας μεταξύ των δύο τρόπων λειτουργίας του μικροδίκτυου και να αντιμετωπίζει ανάλογα τις έκτακτες ανάγκες. Στη συνέχεια θα περιγραφούν οι βασικές απαιτήσεις προστασίας για τους δύο τρόπους λειτουργίας του μικροδίκτυου, αν και αυτές μπορούν να μεταβάλλονται ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις του ενδιαφερόμενου. Αναλυτικότερη διερεύνηση της προστασίας μικροδίκτυων γίνεται στο Κεφάλαιο 4.

3.4.2.1 Προστασία κατά τη διασυνδεδεμένη λειτουργία.

Κατά τη διασυνδεδεμένη λειτουργία η PCM ανιχνεύει και δρα για πέντε πιθανές καταστάσεις:

1. Κανονική κατάσταση.
2. Βραχυκύκλωμα σε τροφοδότη του μικροδίκτυου.
3. Βραχυκύκλωμα στο κυρίως δίκτυο.
4. Βραχυκύκλωμα στο ζυγό του μικροδίκτυου.
5. Επανασυγχρονισμός.

Η PCM λαμβάνει υπόψη τους χρόνους απόκρισης της κάθε μικροπαραγωγής, καθώς και του διακόπτη στο σημείο κοινής σύζευξης (Point of Common Coupling (PCC)) του μικροδίκτυου με το κύριο δίκτυο, διακόπτη CB4 στο Σχ. 3.4.



Σχ. 3.4 Μορφολογία ενός τυπικού μικροδίκτυου.

Κανονική κατάσταση λειτουργίας.

Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας το μικροδίκτυο του Σχ. 3.4 είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο μέσω του διακόπτη CB4 στο PCC. Οι διακόπτες CB1, CB2 και CB3 συνδέουν τους τροφοδότες Α, Β και C στο ζυγό του μικροδίκτυου και τα φορτία τροφοδοτούνται από τις μικροπαραγωγές και το κύριο δίκτυο.

Βραχυκύκλωμα σε τροφοδότη του μικροδίκτυου.

Σε παθητικά ακτινικά συστήματα διανομής το ρεύμα βραχυκυκλώματος ρέει προς μία μόνο κατεύθυνση, από την πηγή στο σημείο του σφάλματος. Γι αυτό βραχυκυκλώματα στον τροφοδότη εκκαθαρίζονται απλά με το άνοιγμα του διακόπτη του. Η ανίχνευση σφαλμάτων πραγματοποιείται βασιζόμενη στο μέτρο του ρεύματος σφάλματος μόνο και όχι στην κατεύθυνσή του. Ωστόσο, επειδή στους τροφοδότες των μικροδίκτυων συνδέονται παραγωγές, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος το ρεύμα σφάλματος τροφοδοτείται και από τις δύο κατευθύνσεις του τροφοδότη από όλες τις μικροπαραγωγές. Εάν ένα τέτοιο σφάλμα δεν εκκαθαριστεί εγκαίρως, υπάρχει πιθανότητα να αποσυνδεθούν όλες οι μικροπαραγωγές, οδηγώντας σε γενικευμένη απώλεια παραγωγής. Για να αποφευχθεί αυτό, οι τροφοδότες A και C στο Σχ. 3.4 διαιρούνται σε ζώνες με διακόπτες, που επιτρέπουν την αποσύνδεση μικρών τμημάτων του τροφοδότη για την απομόνωση του βραχυκυκλώματος. Οι διακόπτες αυτοί περιλαμβάνουν ηλεκτρονόμους κατεύθυνσης-υπερέντασης για να ανιχνεύσουν τη ζώνη του σφάλματος και να το εκκαθαρίσουν. Εάν αυτή η ζώνη περιλαμβάνει κάποια μικροπαραγωγή, τότε αυτή αποσυνδέεται από την ζώνη μέσω του MC της, αλλά συνεχίζει να τροφοδοτεί τα τοπικά φορτία που είναι συνδεδεμένα στο ζυγό της μικροπαραγωγής. Για τη λειτουργία αυτή, η PCM βαθμοθετεί τις ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων έτσι ώστε η ζώνη του σφάλματος να απομονώνεται προτού όλες οι μικροπαραγωγές αποσυνδεθούν από τον τροφοδότη ή προτού ολόκληρο το μικροδίκτυο αποσυνδεθεί από το κύριο δίκτυο. Αυτή η στρατηγική εξασφαλίζει ελάχιστη απώλεια παραγωγής και ευστάθεια του μικροδίκτυου. Επειδή ο τροφοδότης B δεν έχει μικροπαραγωγές τα βραχυκυκλώματά του εκκαθαρίζονται με άνοιγμα του διακόπτη CB2.

Βραχυκύκλωμα στο κυρίως δίκτυο.

Για κάθε βραχυκύκλωμα του δικτύου, το μικροδίκτυο αποσυνδέεται από το δίκτυο με το άνοιγμα του διακόπτη CB4, στο Σχ. 3.4. Η στρατηγική προστασίας για την περίπτωση αυτή είναι αρκετά απλή. Ο ηλεκτρονόμος του CB4 παρακολουθεί το μέτρο και την κατεύθυνση του ρεύματος της κάθε φάσης και στέλνει ένα σήμα ενεργοποίησης στο διακόπτη CB4, αν το ρεύμα ξεπεράσει το επίπεδο επιλογής για προκαθορισμένο χρόνο. Η ρύθμιση του ηλεκτρονόμου γίνεται από την PCM για να εξασφαλίσει ότι η αποσύνδεση επιτυγχάνεται χωρίς σημαντική διακοπή στα κρίσιμα φορτία. Επίσης αυτή η στρατηγική εξασφαλίζει ότι οι μικροπαραγωγές δεν θα αποσυνδεθούν λανθασμένα προτού το μικροδίκτυο αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Μία λανθασμένη αποσύνδεση μικροπαραγωγών προκαλεί αναίτια απώλεια παραγωγής και μείωση του χρόνου ζωής των διακοπών.

Βραχυκύκλωμα στο ζυγό του μικροδίκτυου.

Εάν ένα σφάλμα συμβεί στο ζυγό του μικροδίκτυου, τότε το μικροδίκτυο αποσυνδέεται από το δίκτυο μέσω του διακόπτη CB4. Επίσης οι γραμμές τροφοδοσίας A και C αποσυνδέονται από τον ζυγό με το άνοιγμα των διακοπών CB1 και CB3 αντίστοιχα, Σχ. 3.4. Σε κάθε περίπτωση βραχυκυκλώματος μέσα στο μικροδίκτυο, η PCM βαθμονομεί τον ηλεκτρονόμο του CB4 ώστε να συντονίζεται με την προστασία του κυρίως δικτύου. Ο ηλεκτρονόμος CB4 επίσης βαθμονομείται σε σχέση με τις συσκευές προστασίας των μικροπαραγωγών, ώστε να ελαχιστοποιείται η απώλεια παραγωγής, η διακοπή τροφοδοσίας και οι λανθασμένες αποσυνδέσεις.

Επανασυγχρονισμός.

Όταν το δίκτυο επιστρέφει σε κανονική λειτουργία, τότε είναι ευθύνη της PCM να συγχρονίσει και να επανασυνδέσει το μικροδίκτυο με το κύριο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μόλις σταθεροποιηθεί το δίκτυο και επανέλθει σε κανονική λειτουργία, αφού επανασυνδέσει όλα τα φορτία που είχαν αποσυνδεθεί. Αυτή η διαδικασία απαιτεί από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι κάποια λεπτά, ανάλογα με τη φύση του τροφοδότη και των φορτίων. Η PCM συμπεριλαμβάνει ένα σύστημα ελέγχου για να συγχρονίζει όλες τις μικροπαραγωγές με το δίκτυο, μετρώντας για κάθε φάση το μέτρο και τη φασική γωνία της τάσης, τη συχνότητα και την ακολουθία φάσεων και στις δύο πλευρές του διακόπτη CB4. Η PCM παρέχει τις επιλογές για αυτόματο και χειροκίνητο επανασυγχρονισμό, ανάλογα με την περίπτωση.

3.4.2.2 Προστασία κατά την αυτόνομη λειτουργία.

Ένα μικροδίκτυο σε αυτόνομη λειτουργία έχει αντοχή σε βραχυκύκλωμα στο ζυγό του μικροδίκτυου πολύ μικρότερη σε σχέση με τη διασυνδεδεμένη λειτουργία. Αυτό γίνεται γιατί οι μικροπαραγωγές με τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς τροφοδοτούν ρεύματα βραχυκύκλωσης που φτάνουν μέχρι το διπλάσιο του ρεύματος φορτίου. Αυτά τα χαμηλά ρεύματα βραχυκυκλώματος μπορεί να μην ανιχνεύονται από συμβατικούς ηλεκτρονόμους υπέρεντασης. Έτσι, εφαρμόζονται εναλλακτικοί τρόποι προστασίας, όπως προστασία απόστασης, διαφορικοί ηλεκτρονόμοι ρεύματος/τάσης, ηλεκτρονόμοι μηδενικής ακολουθίας ρεύματος/τάσης ή σχήματα προστασίας που ανιχνεύουν τα ρεύματα γης με κατεύθυνσης-υπέρεντασης ηλεκτρονόμους. Η βασική φιλοσοφία που καθορίζει τη λειτουργία της PCM, σε σχέση με τις πιθανές καταστάσεις του Σχ. 3.4, είναι:

Κανονική λειτουργία.

Υπό κανονική λειτουργία το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα και ο διακόπτης CB4 στο PCC είναι ανοιχτός. Οι τροφοδότες A, B και C είναι συνδεδεμένοι στο ζυγό του μικροδίκτυου και τα φορτία τροφοδοτούνται από τις μικροπαραγωγές.

Βραχυκύκλωμα σε τροφοδότη του μικροδίκτυου.

Η προστασία στους τροφοδότες για αυτόνομη λειτουργία του μικροδίκτυου είναι όμοια με αυτή κατά τη συνδεδεμένη λειτουργία. Η μόνη διαφορά είναι ότι οι ηλεκτρονόμοι πρέπει να είναι πολύ πιο ευαίσθητοι για να ανακαλύπτουν πολύ μικρότερα ρεύματα βραχυκυκλώματος. Ο βασικός σκοπός της προστασίας είναι να ελαχιστοποιήσει την απώλεια παραγωγής και τις διακοπές τροφοδοσίας.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία της PCM πρέπει να λάβει υπόψη την πολυπλοκότητα του μικροδίκτυου, τον αριθμό των μικροπαραγωγών, τους τύπους των τεχνολογιών παραγωγής, τον αριθμό των κρίσιμων φορτίων και τα χαρακτηριστικά απόκρισης των συσκευών προστασίας.

3.4.3 Απαιτούμενες πληροφορίες για τη λειτουργία του κεντρικού ελεγκτή.

Η λειτουργία του μικροδίκτυου εξαρτάται από τις ακόλουθες πληροφορίες:

1. Πληροφορίες τιμολογίου, τιμές καυσίμων και ρυθμιστικές πληροφορίες.
Για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της ενέργειας κατά τη λειτουργία του μικροδίκτυου πρέπει να συγκρίνεται το κόστος της ενέργειας από το δίκτυο και από το μικροδίκτυο. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο εξαρτάται από τις διαφορετικές τιμολογιακές πολιτικές και μαζί με το κόστος του φυσικού αερίου, προπανίου, πετρελαίου θέρμανσης και των βιοκαυσίμων πρέπει να τα εκμεταλλεύεται κατάλληλα ο CC για να ελαχιστοποιήσει το ενεργειακό κόστος.
2. Πληροφορίες για την απόδοση και την παρακολούθηση των μικροπαραγωγών.
Η απόδοση των μικροπαραγωγών εξαρτάται από την περιοχή λειτουργίας τους, τις καιρικές συνθήκες, την ηλικία τους και το πρόγραμμα συντήρησης. Επίσης τα δυναμικά χαρακτηριστικά τους είναι σημαντικά για τη λειτουργία και τον έλεγχο του μικροδίκτυου, επειδή πρέπει να αντιμετωπίζονται οι συνεχείς μεταβολές του φορτίου και οι μεταβολές στη παραγωγή, που λόγω των μεγάλων μεταβατικών ρευμάτων αυξάνουν το κόστος συντήρησης και τη φθορά εξοπλισμού. Όλες αυτές

οι πληροφορίες μαζί με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών πρέπει να συγκεντρώνονται και να αξιοποιούνται από τον CC.

3. Πρόβλεψη του φορτίου.

Η EMM πρέπει να γνωρίζει τον ενεργειακό τύπο των φορτίων, την κατανομή της ζήτησής τους και τις απαιτήσεις τους για να ελέγχει βέλτιστα την παραγωγή του μικροδίκτυου. Τα ηλεκτρικά φορτία πρέπει να τροφοδοτούνται αμέσως, ενώ τα θερμικά έχουν κάποια ευελιξία στο χρόνο και στο ποσοστό κάλυψής τους. Η EMM πρέπει να προσδιορίζει το βαθμό ευελιξίας των θερμικών φορτίων για να βελτιστοποιεί τον προγραμματισμό τους.

4. Πρόγνωση του καιρού.

Οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν την παραγωγή των ανανεώσιμων μικροπαραγωγών και τα φορτία, γι αυτό το σύστημα ελέγχου του μικροδίκτυου πρέπει σε βραχυχρόνια βάση να αξιοποιεί την πρόβλεψη καιρού των τοπικών μετεωρολογικών σταθμών, ενώ σε μακροχρόνια βάση μπορεί να αξιοποιεί στατιστικά δεδομένα.

5. Πληροφορίες για ετερογενείς υπηρεσίες.

Ο CC του μικροδίκτυου πρέπει να εξασφαλίζει αξιόπιστες υπηρεσίες σε ετερογενή φορτία με διαφορετικό συντελεστή προτεραιότητας. Γι αυτό το λόγο τα φορτία πρέπει να ταξινομηθούν ανάλογα με τις παραμέτρους προτεραιότητάς τους, που καθορίζονται από τη φύση της ζήτησης. Τα φορτία μπορούν να ταξινομηθούν σε: φορτία κρίσιμης σημασίας τροφοδοσίας, φορτία περιορισμένης σημασίας και φορτία με δυνατότητα επανασχεδιασμού της τροφοδοσίας τους.

- Κρίσιμης σημασίας: τα φορτία που πρέπει να τροφοδοτούνται χωρίς διακοπή, ανεξαρτήτως κόστους και κατάστασης του συστήματος.
- Περιορισμένης σημασίας: Τα φορτία που είναι αρκετά ευέλικτα ώστε να μπορούν να τροφοδοτηθούν τμηματικά, αν αυτό οδηγεί σε μείωση του ηλεκτρικού λογαριασμού.
- Φορτία που η τροφοδοσία τους μπορεί να προγραμματιστεί και να γίνει σε ώρες που διευκολύνουν την οικονομική λειτουργία του συστήματος.

3.4.4 Στρατηγικές ελέγχου για το σχεδιασμό του CC.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία του CC απαιτεί μια στρατηγική ελέγχου που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες διαχείρισης του μικροδίκτυου. Η επιλογή της στρατηγικής ελέγχου του CC εξαρτάται από την απόδοση και το κόστος της εφαρμογής της. Κάποιες κατάλληλες στρατηγικές που περιγράφονται σύντομα στη

συνέχεια είναι: βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο, έλεγχος έμπειρου συστήματος και αποκεντρωμένος έλεγχος.

3.4.4.1 Βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο.

Η βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο είναι η πιο κατάλληλη στρατηγική για το σχεδιασμό της EMM. Σε αυτήν το σύστημα προς βελτιστοποίηση εκφράζεται μαθηματικά ως μια συνάρτηση στόχου που υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς και πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί. Οι αλγόριθμοι για τη λύση του προβλήματος χρησιμοποιούν τεχνικές ευφυούς αναζήτησης για να βρουν τη βέλτιστη λύση. Αντί να ψάχνουν όλες τις καταστάσεις του συστήματος, χρησιμοποιούν τη γνώση που έχουν για τη δομή του συστήματος, ώστε να αναζητήσουν τη βέλτιστη λύση σε ένα μικρό τμήμα των επιτρεπόμενων καταστάσεων. Αν η συνάρτηση στόχου και οι περιορισμοί είναι γραμμικές εξισώσεις τότε για τη λύση τους χρησιμοποιείται γραμμικός προγραμματισμός, που εγγυάται την εύρεση της λύσης και με σχετικά μικρό υπολογιστικό φόρτο. Αν όμως υπάρχουν περιορισμοί του τύπου ναι/όχι ή ποσότητες, όπως το πλήθος των μηχανών ή των ανθρώπων, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί μη γραμμικός προγραμματισμός.

Για τη στρατηγική βελτιστοποίησης, η EMM συλλέγει πληροφορίες που αφορούν τις μεταβλητές του μικροδίκτυου, όπως λειτουργικές καταστάσεις (τάση, ρεύμα, επίπεδα ισχύος), ποσότητα παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, απαιτήσεις φορτίου, καιρικές συνθήκες, κατάσταση διακοπών (on/off), λειτουργική κατάσταση του εξοπλισμού (κανονική λειτουργία/διακοπή λειτουργίας λόγω συντήρησης/συναγερμός) κ.α.. Η EMM αρχικά πρέπει να εκτιμήσει όλες τις παρούσες και παλαιότερες μεταβλητές, στοχαστικές περιγραφές των φορτίων, τον καιρό, τις τιμές της αγοράς και τον εξοπλισμό ώστε να προβλέψει μελλοντικές λειτουργικές καταστάσεις του μικροδίκτυου. Μετά από αυτά στέλνει τον προγραμματισμό λειτουργίας των συσκευών του μικροδίκτυου. Για την απλοποίηση του αλγόριθμου ελέγχου, κάποιες πληροφορίες μπορεί να προσεγγιστούν από σταθερές τιμές, εφόσον αυτές οι προσεγγίσεις δεν αποκλίνουν πολύ από την πραγματική συμπεριφορά.

3.4.4.2 Έμπειρα συστήματα.

Η βελτιστοποίηση πραγματικού χρόνου έχει μεγάλο υπολογιστικό βάρος και χρειάζεται αρκετό χρόνο για να φθάσει σε λύση, ανάλογα με την πολυπλοκότητα και τη μη γραμμικότητα του συστήματος. Επίσης, το κόστος υλοποίησής της σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου είναι υψηλό. Έτσι εφαρμόζονται τεχνικές

τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence (AI)), όπως η ασαφής λογική για το σχεδιασμό του CC. Τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης προσομοιώνουν την ανθρώπινη λογική και ο αλγόριθμος ελέγχου προγραμματίζεται από μια σειρά προτάσεων λήψης αποφάσεων "If-Then" (Αν-Τότε). Ένας έμπειρος ελεγκτής περνάει από ένα πεπερασμένο σύνολο επιλογών ελέγχου και λαμβάνει μία απόφαση σύμφωνα με κάποιους κανόνες βάσης. Τα συστήματα ασαφούς λογικής είναι μία μορφή των συμβατικών έμπειρων συστημάτων. Θεωρούν αλληλεπικαλυπτόμενες κατηγορίες καταστάσεων και αξιολογούν σε τι έκταση το σύστημα ανήκει σε μία συγκεκριμένη κατηγορία. Εδώ, αρκετοί "If" όροι ικανοποιούνται ταυτόχρονα αλλά σε διαφορετική έκταση και η τελική απόφαση ελέγχου είναι μία σταθμισμένη συνάρτηση των αντίστοιχων "Then" αποφάσεων.

Για εφαρμογή σε μικροδίκτυο, η EMM που βασίζεται σε ασαφή λογική, αξιολογεί την κατάσταση του μικροδίκτυου, ώστε να καθορίσει σε ποια προκαθορισμένη κατηγορία βρίσκεται η παρούσα κατάσταση και να υλοποιήσει τον κανόνα που σχετίζεται με την κατηγορία αυτή. Για βελτιστοποίηση, οι καταστάσεις πρέπει να κατηγοριοποιηθούν και να ορισθούν οι κανόνες για αυτές πριν την εφαρμογή στην EMM. Ύστερα, στρατηγικές προσαρμοστικού ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον επανακαθορισμό των κανόνων, ώστε οι τελευταίοι να ταιριάζουν στις απαιτήσεις του συστήματος διαχείρισης.

Ένα σημαντικό όφελος του συστήματος με ασαφή ελεγκτή είναι ότι προσεγγίζει την ανθρώπινη λογική. Έτσι, ακόμα και εάν δεν είναι δυνατόν να κατηγοριοποιήσει τις καταστάσεις και να καθορίσει εξ αρχής κανόνες για τις κατηγορίες, θα ήταν δυνατό να κατασκευαστεί ο ελεγκτής απλά εφαρμόζοντας τη λογική που ακολουθούν οι χειριστές.

3.4.4.3 Αποκεντρωμένος και ιεραρχικός έλεγχος.

Οι τεχνικές αποκεντρωμένου και ιεραρχικού ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:

- i. Την ενοποίηση μεμονωμένων μικροδίκτυων ώστε να δημοπρατούν το πλεόνασμα ισχύος στο κύριο δίκτυο.
- ii. Την ενοποίηση μεμονωμένων μικροπαραγωγών ώστε να δημοπρατούν την παραγόμενη ισχύ τους σε καταναλωτές του μικροδίκτυου.

Σε αυτόν τον έλεγχο, η λήψη αποφάσεων ακολουθεί ιεραρχική δομή. Ένας πράκτορας (agent) συλλέγει προσφορές ζήτησης και παροχής ισχύος από πολλούς πράκτορες και λαμβάνει αποφάσεις αποστολής για μεμονωμένους πράκτορες σύμφωνα με προκαθορισμένους κανόνες. Οι κανόνες αυτοί μπορεί να

καθορίζονται από έναν ελεγκτή υψηλότερου επιπέδου. Στην περίπτωση του μικροδίκτυου, οι μεμονωμένοι καταναλωτές και πάροχοι θα δρούσαν ως πράκτορες και θα ανέφεραν στον ανεξάρτητο χειριστή του συστήματος (Independent System Operator (ISO)).

3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπάρχουν μερικά βασικά θέματα που πρέπει να μελετηθούν ώστε να βελτιωθεί η σχεδίαση των συστημάτων διαχείρισης του μικροδίκτυου και να γίνουν ευφυή. Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύχθηκε πως και σε ποια έκταση πρέπει να ληφθούν υπόψη από τον ελεγκτή θέματα όπως, η αναμόρφωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι επιπτώσεις στο σύστημα διανομής, οι απαραίτητες υποδομές τηλεπικοινωνιών, οι βοηθητικές υπηρεσίες και η προστασία.