



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ – ΛΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ
ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΕ

Κωνσταντίνα Χαραλαμπάκη

Επιβλέπων: Κανέλλος Φώτιος

Περιεχόμενα

Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)	8
1.1 Σύστημα παραγωγής.....	10
1.1.1 Θερμικοί Σταθμοί.....	12
1.1.2 Υδροηλεκτρικοί / Υδραντλητικοί σταθμοί	19
1.1.3 Σταθμοί ΑΠΕ	22
1.2 Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	30
1.2.1 Γραμμές Μεταφοράς	32
1.2.2 Υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ Κέντρα Υπερυψηλής τάσης.....	38
1.3 Δίκτυο Διανομής.....	41
2.Κυριότερες Τεχνολογίες Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ.....	44
2.1 Ανεμογεννήτριες	44
2.1.1 Στοχαστική φύση του ανέμου και εκτίμηση αιολικής παραγωγής	46
2.1.2 Κατασκευαστική δομή και τύποι ανεμογεννητριών.....	60
2.1.3 Δομή του ηλεκτρικού μέρους των ανεμογεννητριών.....	72
2.1.4 Λειτουργία μεταβλητών στροφών και βέλτιστη ενεργειακή απόδοση.....	80
2.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα	84
2.2.1 Χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας	86
2.2.2 Φωτοβολταϊκό στοιχείο και Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	89
2.2.3 Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης φωτοβολταϊκού στοιχείου	95
2.2.4 Κατασκευαστική δομή Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	100
2.3 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί	114
2.3.1 Κύρια μέρη ενός υδροηλεκτρικού σταθμού.....	116
2.3.2 Τύποι υδροηλεκτρικών σταθμών.....	120
3. Χαρακτηριστικά λειτουργίας ΣΗΕ	128
3.1 Ισοζύγιο Ισχύος – Ελέγχου Φορτίου Συχνότητας.....	128
3.2 Τεχνικοί περιορισμοί Θερμοηλεκτρικών Σταθμών	130
3.3 Οικονομική Λειτουργία ΣΗΕ.....	132
3.4 Χαρακτηριστικά και πρόβλεψη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.....	141
3.5 Ικανότητα Μεταφοράς.....	145
3.6 Προβλήματα λειτουργίας ΣΗΕ λόγω μεγάλης διείσδυσης των ΑΠΕ.....	149
4.Τεχνικές Λύσεις για την ενίσχυση της διείσδυσης των ΑΠΕ	151
4.1 Γενικά	151
4.2 ΑΠΕ φιλικές με το δίκτυο (Grid – Friendly RE generation)	152

4.2.1 Ανάγκη για ΑΠΕ φιλικές με το δίκτυο	152
4.2.2 Σύνθετα χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής από ΑΠΕ	152
4.2.3 Κεντρικός έλεγχος ενός συμπλέγματος μονάδων ΑΠΕ	155
4.2.4 Βελτιώσεις στον τομέα μοντελοποίησης των μονάδων ΑΠΕ	156
4.3 Βελτίωση ευελιξίας στη συμβατική παραγωγή	158
4.3.1 Ανάγκη για περισσότερη ευελιξία στη συμβατική παραγωγή	158
4.3.2 Αξιολόγηση ευέλικτης παραγωγής	158
4.3.3 Προγραμματισμός παραγωγής για επάρκεια ισχύος και ευελιξία.....	162
4.4 Επέκταση συστήματος μεταφοράς.....	165
4.4.1 Ανάγκες για την επέκταση συστήματος μεταφοράς	165
4.4.2 Εφαρμογή των νέων τεχνολογιών μεταφοράς	165
4.4.3 Εξελίξεις στο σχεδιασμό συστημάτων μεταφοράς.....	171
4.5 Αναβάθμιση Κέντρων Ελέγχου Ενέργειας	173
4.5.1 Ανάγκες για αναβάθμιση	173
4.5.2 Πρόγνωση της παραγωγής από ΑΠΕ	174
4.5.3 Ενίσχυση των επιχειρησιακών εργαλείων και πρακτικών.....	177
4.6 Απόκριση ζήτησης	181
4.6.1 Απόκριση φορτίου (Demand Response DR).....	181
4.6.2 Πρακτικές στην απόκριση φορτίου.....	183
4.6.3 Τεχνολογίες που ενισχύουν την απόκριση ζήτησης.	186
Συμπεράσματα	188
Βιβλιογραφία	190

Περίληψη

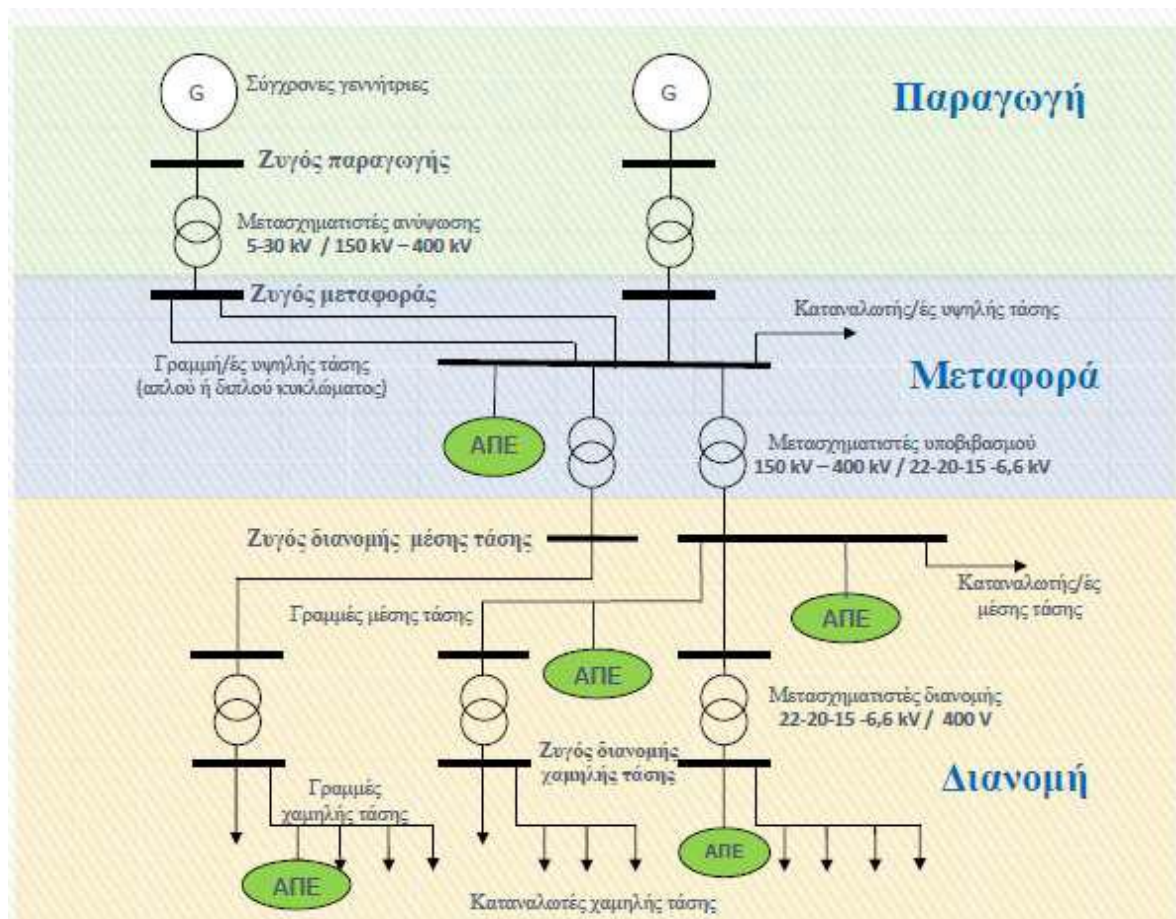
Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) προωθείται και ενισχύεται με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς σε όλο τον αναπτυγμένο κόσμο. Το σημαντικότερο κίνητρο για την προώθηση των ΑΠΕ είναι τα συσσωρευμένα οικολογικά προβλήματα που δημιουργήσε η αλόγιστη χρήση αφενός των συμβατικών καυσίμων και αφετέρου της πυρηνικής ενέργειας. Για το σχεδιασμό όμως και τη λειτουργία ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιοι σημαντικοί τεχνικοί και λειτουργικοί περιορισμοί λόγω της αυξημένης διείσδυσης των ΑΠΕ. Έτσι στην εργασία αυτή μελετώνται οι τεχνικές απαιτήσεις και οι ανάλογες λύσεις που απαιτούνται για τη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ στο ΣΗΕ.

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από 3 μέρη, το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το δίκτυο διανομής. Η συνέχεια επικεντρώνεται στις κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και συγκεκριμένα γίνεται εκτενής αναφορά στις ανεμογεννήτριες τα φωτοβολταϊκά συστήματα και τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Αναλύονται επίσης τα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας τα οποία πρέπει να ληφθούν σε κάθε περίπτωση για την ομαλή και βέλτιστη λειτουργία του. Τέλος γίνεται διερεύνηση των τρόπων επίλυσης των ζητημάτων που προκύπτουν από τη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί της λειτουργίας ενός ΣΗΕ που τίγονται προηγουμένως

Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στις εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Συμπεριλαμβάνει ακόμα όλα τα απαραίτητα συστήματα ελέγχου και τηλεπικοινωνιών για την ορθή λειτουργία του. Μία από τις βασικότερες προϋποθέσεις για να λειτουργήσει σωστά ένα ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια όπου υπάρχει ζήτηση, χωρίς όμως να την ξεπερνάει ή να υστερεί. Αυτό το ισοζύγιο Παραγωγής –Κατανάλωσης είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί όταν υπάρχουν στην παραγωγή οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Πολύ σημαντικό είναι η ηλεκτρική ενέργεια να παρέχεται στους καταναλωτές με υψηλή αξιοπιστία, αδιάλειπτα, με ποιοτική και σταθερή τάση και συχνότητα και να εξασφαλίζεται το ελάχιστο δυνατό κόστος και οι ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα η τάση μπορεί να μεταβάλλεται εντός συγκεκριμένων ορίων, που αν τα ξεπεράσει το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει τα απαραίτητα μέτρα ώστε να επαναφέρει την τάση. Επειδή η παροχή ενέργειας πρέπει να γίνεται αδιάλειπτα, είναι απαραίτητο να υπάρχουν οι κατάλληλες προδιαγραφές στο κέντρο ελέγχου ενέργειας οπότε είναι απαραίτητο να μουν κανόνες για τα όρια παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αντίστοιχες προδιαγραφές για τη λειτουργία τους.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας για να τροφοδοτήσει τους καταναλωτές περιλαμβάνει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες, την **παραγωγή**, τη **μεταφορά** και τη **διανομή**. Η ηλεκτρική ενέργεια από τη στιγμή που θα παραχθεί μέχρι τη στιγμή που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε διαρκή ροή. Παρόλο που αναπτύσσονται συνεχώς νέες τεχνολογίες για την αποθήκευση της δεν έχει επιτευχθεί ακόμα οικονομική και αποδοτική αποθήκευση, γι' αυτό η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παράγεται τη στιγμή της ζήτησης της. Στην εικόνα 1.1 που ακολουθεί απεικονίζονται οι τρεις λειτουργίες του ΣΗΕ. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1 εκτός από την παραγωγή, οι ΑΠΕ στη μεταφορά και στη διανομή. Επίσης υπάρχει αμφίδρομη ροή ισχύος με αποτέλεσμα να χρειάζονται λιγότερα έργα μεταφοράς αλλά να δημιουργούνται νέες δυσκολίες στη λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 1.1: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [2. Κανέλλος, Φ. (2012)]

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής και τροφοδοτείται σε ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο μεταφοράς. Υπάρχουν δύο είδη σταθμών, οι συμβατικοί και οι μη συμβατικοί. Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων και τη μηχανική ενέργεια των υδάτινων ροών και υδατοπτώσεων σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνεχώς αυξανόμενο μερίδιο καταλαμβάνουν οι μη συμβατικοί σταθμοί παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσεως (150-400 kV στην Ελλάδα) σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης. Οι γραμμές αυτές μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κομβικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς. Από τους υποσταθμούς ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσεως (20/15 kV στην Ελλάδα) που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσεως (400-230 V στην Ελλάδα).

1.1 Σύστημα παραγωγής

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας. Στα σύγχρονα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται κάποια πρωτογενής μορφή ενέργειας, αρχικά σε μηχανική (κινητήριες μηχανές, στρόβιλοι) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννητριών. Τα συστήματα παραγωγής παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τους διαθέσιμους εγχώριους ενεργειακούς πόρους, την ενεργειακή πολιτική, τις γεωλογικές, γεωφυσικές και κλιματολογικές ιδιαιτερότητες της χώρας. Οι πηγές παραγωγής ενέργειας διαχωρίζονται σε:

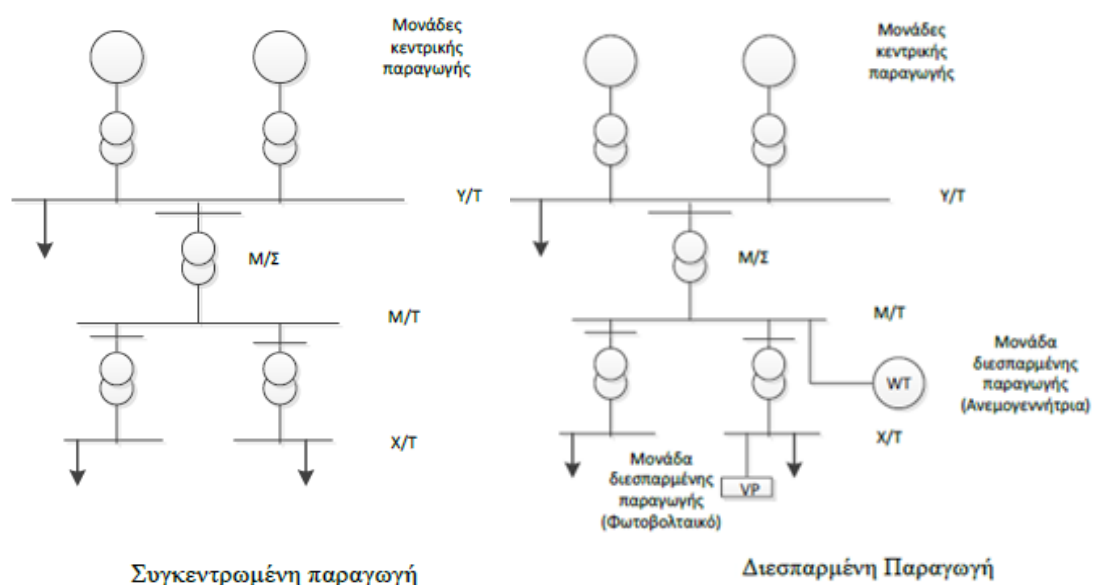
- **Συμβατικές πηγές ενέργειας** όπως είναι τα ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα (για παράδειγμα πετρέλαιο, άνθρακας-λιθάνθρακας και λιγνίτης-φυσικό αέριο)
- **Πυρηνική ενέργεια** που προέρχεται από σχάση φυσικού ή εμπλουτισμένου ουρανίου καθώς και μεικτού οξειδίου (ουράνιο και πλουτόνιο)
- **Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)** οι οποίες χαρακτηρίζονται ως ανανεώσιμες γιατί έχουν ανεξάντλητα αποθέματα όπως τον άνεμο τον ήλιο και το νερό.

Σε ορισμένες πετρελαιοπαραγωγικές χώρες, η συμμετοχή του πετρελαίου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή καθώς το ποσοστό συμμετοχής αγγίζει έως και το 100%. Αντίθετα, στις υπόλοιπες χώρες το ποσοστό του πετρελαίου στην παραγωγή ηλεκτρισμού τείνει να περιοριστεί σημαντικά. Αξιοσημείωτη είναι η αυξημένη χρήση του φυσικού αερίου ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε χώρες όπως είναι η Ολλανδία και η Ιρλανδία, όπου το ποσοστό συμμετοχής φτάνει το 60% και το 50% αντίστοιχα.

Βάσει ιστορικών στατιστικών δεδομένων, η χρήση του λιθάνθρακα είναι κυρίαρχη στην Νότια Αφρική (93%) και στην Πολωνία (92%), ενώ στις χώρες όπως στη Δανία (54%), στη Μ.Βρετανία (37,5%), στην Κορέα (38%) και στις Ην. Πολιτείες (σχεδόν 50%), η χρήση του βρίσκεται σε υψηλά ποσοστά [17. PAE. (2013)]. Αντίστοιχα, η χρήση της πυρηνικής ενέργειας κατά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή ποσοστιαία σε χώρες όπως η Γαλλία (78%), το Βέλγιο (54,5%), η Ουγγαρία (37,5%), η Σουηδία (47%), η Ν. Κορέα (37%) και η Ελβετία (43%) (PAE, 2013). Η υδροηλεκτρική ενέργεια φαίνεται να έχει πολύ υψηλά ποσοστά στις χώρες όπως η Νορβηγία (98,5%), η Αυστρία (64%), ο Καναδάς (58%), η Ελβετία (51%), η Γκάνα (67%), η Βραζιλία (83%), η Κένυα (51%) και η Βενεζουέλα 72%.

Η Ελλάδα χρησιμοποιεί, σε μεγάλο βαθμό, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα βόρεια της χώρας στο νότο, όπου η κατανάλωση συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ποσοστό, προκαλεί αυξημένες απώλειες. Παρόλα αυτά, το πλεόνασμα σε κοιτάσματα λιγνίτη των σταθμών αυτών, ο οποίος αποτελεί την πρώτη καύσιμη ύλη, έπαιξε σημαντικό ρόλο για το σχεδιασμό του συστήματος παραγωγής και τοποθέτηση πολλών και μεγάλων μονάδων στην περιοχή της δυτικής Μακεδονίας.

Υπάρχουν δύο μοντέλα συστημάτων παραγωγής. Η συγκεντρωμένη παραγωγή και η διεσπαρμένη παραγωγή. Στο σύστημα συγκεντρωμένης παραγωγής η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τους διάφορους σταθμούς παραγωγής, αποστέλλεται στο σύστημα μεταφοράς και έπειτα στα τοπικά δίκτυα διανομής και τους καταναλωτές. Στη διεσπαρμένη παραγωγή η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από πολλές μονάδες παραγωγής οι οποίες είναι συνήθως εγκαταστημένες κοντά στα σημεία κατανάλωσης. Συνήθως πρόκειται για μονάδες παραγωγής μικρής κλίμακας, έως μερικές εκατοντάδες kW.



Εικόνα 1.2: Διαγράμματα Συγκεντρωμένης Παραγωγής και Διεσπαρμένης Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στους καταναλωτές προέρχεται από τα εξής βασικά είδη εργοστασίων παραγωγής.

- Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας
- Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας
- Σταθμοί παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

1.1.1 Θερμικοί Σταθμοί

Οι θερμικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση διασυνδεδεμένων δικτύων και η ηλεκτρική ισχύς που παρέχουν καταλαμβάνει πολύ μεγάλο ποσοστό σε σχέση με τη συνολική ισχύ που συλλέγεται από όλους τους σταθμούς παραγωγής. Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί μετατρέπουν τη θερμότητα σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια και κατηγοριοποιούνται σε συμβατικούς και πυρηνικούς. Η κατηγοριοποίηση αυτή γίνεται με βάση τα καύσιμα που χρησιμοποιούν. Διεθνώς οι συμβατικοί σταθμοί χρησιμοποιούν λιθάνθρακα, λιγνίτη, τύρφη, πετρέλαιο (diesel ή μαζούτ) και το φυσικό αέριο ενώ οι πυρηνικοί σταθμοί χρησιμοποιούν κυρίως μείγμα σχάσιμου ουρανίου U235 και άλλων ισότοπων του. Ανάλογα με το μέσο που χρειάζεται για την πραγματοποίηση του θερμοδυναμικού τους κύκλου, οι θερμικοί σταθμοί χωρίζονται σε ατμοηλεκτρικούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν ατμοστρόβιλους, σε αεριοστροβιλικούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν αεριοστρόβιλους, σε ντιζελοηλεκτρικούς που χρησιμοποιούν εμβολοφόρες μηχανές ντήζελ και σε πυρηνικούς. Υπάρχουν και σταθμοί παραγωγής συνδυασμένου κύκλου οι οποίοι είναι ένας συνδυασμός αεριοστροβιλικών και ατμοηλεκτρικών σταθμών.

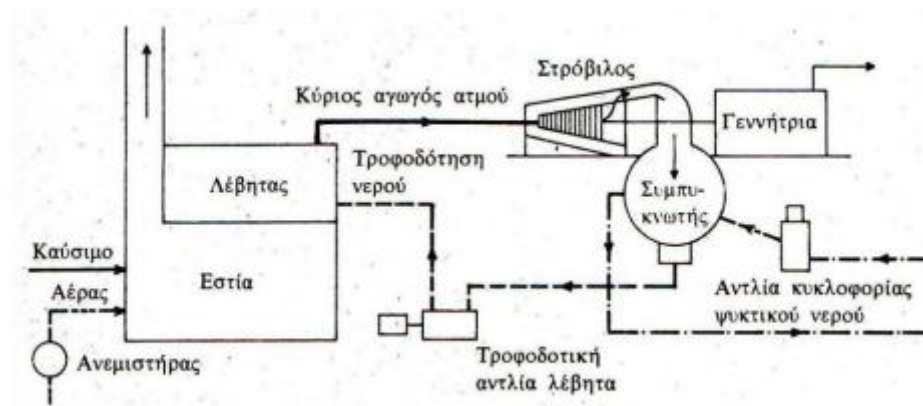
Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί

Δομή: Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί (ΑΗΣ) αποτελούνται από μία ή και περισσότερες μονάδες που εργάζονται παράλληλα. Κάθε μονάδα έχει συνήθως το δικό της λέβητα, στρόβιλο, γεννήτρια, πύργο ψύξης, καμινάδα και όλο το ηλεκτρικό σύστημα μέχρι το δίκτυο. Οι εγκαταστάσεις μεταφοράς καυσίμου είναι κοινές και σε ορισμένες περιπτώσεις και η καμινάδα. Στην εικόνα 1.3 φαίνεται το διάγραμμα μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας.

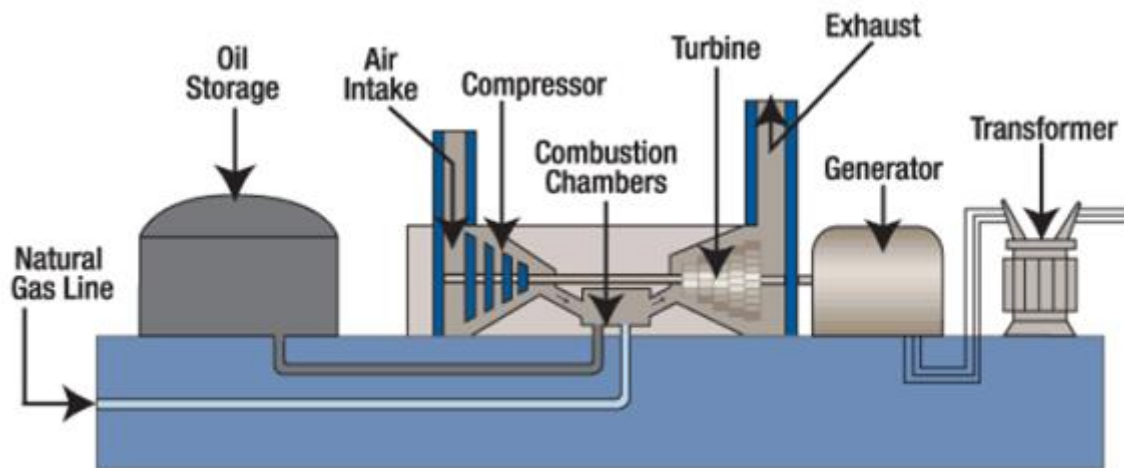
Λειτουργία: Το καύσιμο καίγεται στην εστία ενός ατμοπαραγωγού (λέβητα) μέσα στον οποίο παράγεται υπέρθερμος ατμός (π.χ. 540°C). Ο παραγόμενος ατμός κινεί τον ατμοστρόβιλο, που μπορεί να αποτελείται από περισσότερες από μία βαθμίδες (υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης) και ο οποίος στη συνέχεια κινεί την ηλεκτρογεννήτρια. Στην έξοδο του στροβίλου ο ατμός συμπυκνώνεται σε νερό στο ψυγείο με τη βοήθεια του εναλλάκτη θερμότητας που διαρρέεται από ψυχρό νερό. Στο ψυγείο γίνεται η αποβολή της θερμότητας που δεν χρησιμοποιήθηκε και καταλήγει στον πύργο ψύξης απ' όπου αποβάλλεται στο περιβάλλον.

Καύσιμα και απόδοση: Τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούν οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί είναι λιθάνθρακας, λιγνίτης, τύρφη, μαζούτ και φυσικό αέριο. Ο βαθμός απόδοσης τους είναι 30-45% , σχετικά μεγάλος για θερμικά εργοστάσια.

Στην Ελλάδα οι λιγνιτικοί ΑΗΣ λόγω του σχετικά μεγάλου βαθμού απόδοσης και του φθηνού καυσίμου έχουν μικρό λειτουργικό κόστος ανά παραγόμενη kWh και χρησιμοποιούνται ως σταθμοί βάσης. Το μειονέκτημα τους όμως είναι ότι χρειάζονται πολλές ώρες και μια πολύπλοκη διαδικασία για την εκκίνηση τους και η μεγάλη οικολογική επιβάρυνση που επιφέρει η χρήση τους.



Εικόνα 1.3 Ατμοηλεκτρική Μονάδα Παραγωγής

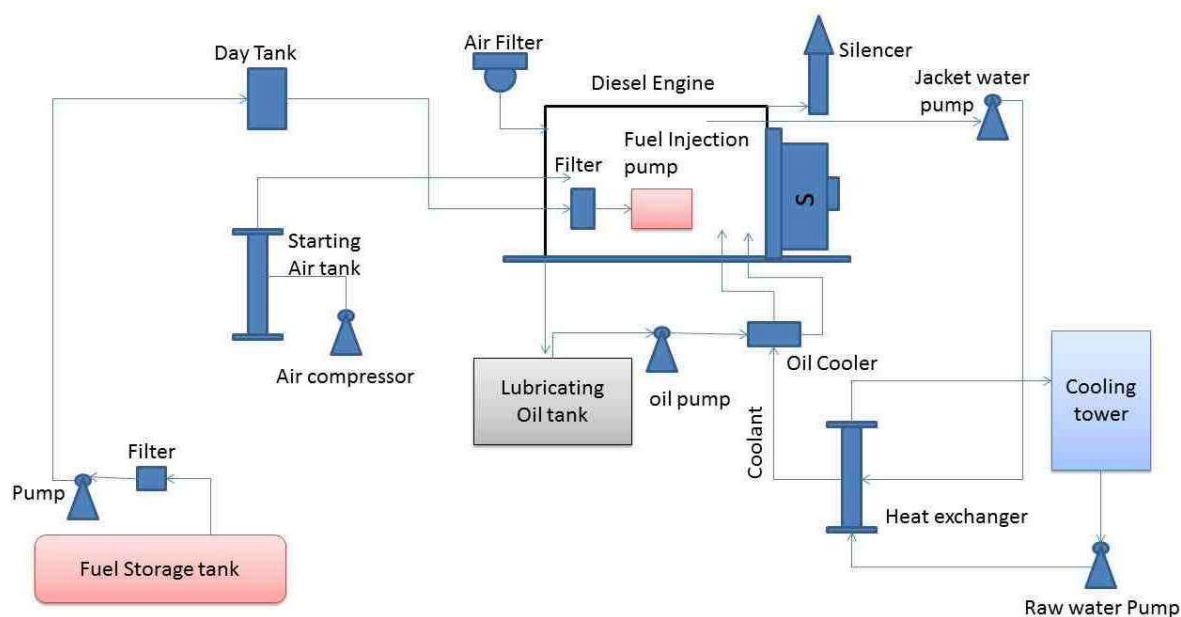


Εικόνα 1.5 Αεριοστροβιλικός σταθμός

Ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί

Οι ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν εμβολοφόρους κινητήρες με καύσιμο το ντίζελ. Χρησιμοποιούν διάφορα αποστάγματα του πετρελαίου (τα βαρύτερα χρησιμοποιούνται για τους μεγαλύτερους κινητήρες) και ο βαθμός απόδοσης σε μεγάλες μονάδες φτάνει το 50%. Η ρύθμιση της ισχύος δεν παρουσιάζει προβλήματα.

Στην Ελλάδα οι ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί δεν χρησιμοποιούνται στο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Χρησιμοποιούνται όμως στα απομονωμένα συστήματα όπως της Κρήτης και της Ρόδου και σε άλλα μικρότερα αυτόνομα δίκτυα νησιών.



Εικόνα 1.6: Ντιζελοηλεκτρικός Σταθμός[www.nepalenergyforum.com, 2012]

Πυρηνικοί σταθμοί

Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι στην ουσία όμοιοι με τους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς με τη διαφορά ότι η παραγωγή ατμού γίνεται με τη χρήση θερμικής ενέργειας η οποία εκλύεται από ένα πυρηνικό αντιδραστήρα.

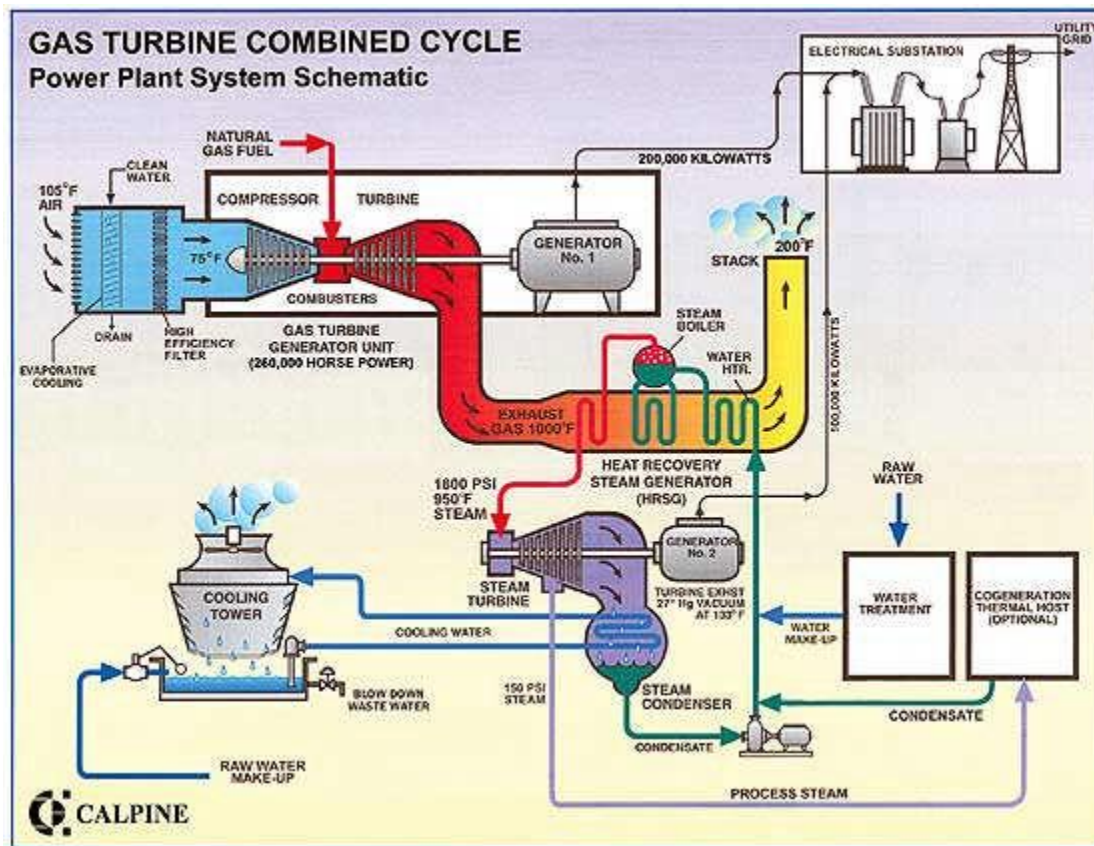
Σταθμοί συνδυασμένου κύκλου

Δομή: Οι σταθμοί αυτοί είναι συνδυασμός των ατμοηλεκτρικών και των αεριοστροβιλικών σταθμών. Ένας σταθμός συνδυασμένου κύκλου αποτελείται από μια ή, συνήθως, περισσότερες αεριοστροβλικές μονάδες με τους αντίστοιχους λέβητες καυσαερίων από το ζεύγος ατμοστροβίλου – γεννήτριας.

Λειτουργία: Οι αεριοστροβλικές μονάδες χρησιμοποιούνται ως αρχικές μονάδες κάψης του καυσίμου των οποίων τα παραγόμενα καυσαέρια 300-600 °C διοχετεύονται σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας όπου εκεί παράγεται ατμός που κινεί τον ατμοστροβίλο.

Κάυσιμα και απόδοση: Οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιούν τα καύσιμα των αεριοστροβίλων, δηλαδή πετρέλαιο diesel και φυσικό αέριο. Η ρύθμιση της εξόδου τους λόγω του κύκλου ατμού δεν γίνεται τόσο γρήγορα όσο στους αεριοστροβιλικούς σταθμούς. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης τους φτάνει το 50%.

Γενικά έχουν χαρακτηριστικά ενδιάμεσα των αεριοστροβιλικών και ατμοστροβιλικών σταθμών και χρησιμοποιούνται συνήθως ως σταθμοί κυμαινόμενου φορτίου.



Εικόνα 1.7 Θερμικός Σταθμός Συνδυασμένου Κύκλου

Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου πλεονεκτούν σε σχέση με τις υπόλοιπες θερμικές μονάδες σε διάφορα επίπεδα.

- Ο **βαθμός απόδοσης τους φτάνει το 55%** (δηλαδή 20% περισσότερο από την απόδοση των άλλων θερμικών μονάδων). Η υψηλή αυτή απόδοση οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία που προκύπτει από την εκτόνωση των αερίων από τον θάλαμο καύσης και στην χρησιμοποίηση των καυσαερίων.
- Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου είναι αρκετά **ευέλικτες** καθώς μπορούν να χρησιμοποιούν μια σειρά καυσίμων, όπως φυσικό αέριο, πετρελαϊκά προϊόντα καθώς και άλλα καύσιμα.
- Οι μονάδες αυτού του τύπου κοστίζουν περισσότερο κατά την εγκατάστασή τους σε σχέση με τις συμβατικές ατμοηλεκτρικές μονάδες λόγω της τεχνολογίας καθώς και των υλικών που χρησιμοποιούνται. Ωστόσο **απαιτούν μικρότερο χώρο και έχουν μικρότερο χρόνο και κόστος εγκατάστασης.**

- Είναι πιο **φιλικό προς το περιβάλλον** από άλλες θερμικές μονάδες αφού η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων είναι αρκετά χαμηλότερη λόγω του σχετικά υψηλού βαθμού απόδοσης συνδυασμένου κύκλου.
- Τέλος έχουν **γρήγορη ανταπόκριση σε διαταραχές** αφού έχουν μεγάλο ρυθμό ανάληψης φορτίου (20% ανά λεπτό), αντιμετωπίζουν δηλαδή αρκετά γρήγορα διαταραχές στην ισορροπία παραγωγής ισχύος και φορτίου.

1.1.2 Υδροηλεκτρικοί / Υδραντλητικοί σταθμοί

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι σταθμοί παραγωγής που μετατρέπουν την ενέργεια των υδάτινων ροών και υδατοπτώσεων σε μηχανική και ακολούθως σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως το νερό χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός στρόβιλου. Ο στρόβιλος περιστρέφει μια γεννήτρια και έτσι παράγεται ηλεκτρισμός. Περίπου 4-5% της συνολικής ενέργειας που παρέχεται στην κοινωνία μας προέρχεται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Στην εικόνα 1.8 φαίνεται ένα χαρακτηριστικό υδροηλεκτρικό φράγμα σε λειτουργία.



Εικόνα 1.8 Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο

Η κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου αρχίζει από την επιλογή της κατάλληλης θέσης, η οποία εξαρτάται από πολλούς παραμέτρους. Είναι λοιπόν απαραίτητο να ληφθούν υπόψη υδρολογικές, μορφολογικές γεωλογικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές παράμετροι.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής διακρίνονται σε σταθμούς φυσικής ροής, ρυθμιζόμενης ροής και υδραντλητικούς σταθμούς. Αναλυτική περιγραφή των υδροηλεκτρικών σταθμών παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.3.

Πλεονεκτήματα υδροηλεκτρικών σταθμών

- Οι υδατοπτώσεις είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και δεν υπάρχει ορατός κίνδυνος εξαντλήσεως τους, όπως ισχύει για τα συμβατικά καύσιμα.
- Η κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου συνδυάζεται συχνά και με άλλα έργα όπως άρδευσης, ύδρευσης, ρύθμισης πλημμύρας και άλλα.
- Τα καύσιμα ενός υδροηλεκτρικού σταθμού έχουν μηδενικό κόστος και απαιτείται λιγότερο προσωπικό και πιο αραιή συντήρηση από ότι σε ένα

συμβατικό σταθμό παραγωγής. Μάλιστα το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και αντιστοιχεί ουσιαστικά στις αποσβέσεις του έργου.

- Οι υδροστροβίλοι είναι αξιόπιστες μηχανές και δεν απαιτούν πολύ συχνή συντήρηση και επίβλεψη.
- Μαζί με τα έργα για την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου κατασκευάζονται απαραίτητα έργα υποδομής όπως δρόμοι και γέφυρες τα οποία βοηθούν στην αξιοποίηση απομακρυσμένων περιοχών.
- Η διάρκεια ζωής των υδροηλεκτρικών έργων είναι μεγάλη και μπορεί να γίνει ακόμη μεγαλύτερη με κατάλληλη ανανέωση του ηλεκτρικού και μηχανολογικού εξοπλισμού.
- Τέλος πολύ σημαντικό είναι ότι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν τη δυνατότητα γρήγορης μεταβολής της παραγωγής τους έτσι ώστε να γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και η κάλυψη των αιχμών του διασυνδεδεμένου δικτύου. Αυτό το ρόλο αναλαμβάνουν τα υδροηλεκτρικά έργα αποθήκευσης μεγάλης ισχύος, δηλαδή έργα των οποίων το φράγμα δημιουργεί δεξαμενή μεγάλης χωρητικότητας. Η δυνατότητα κάλυψης των αιχμών ισχύος του συστήματος είναι πολύ σημαντική από τεχνικής και οικονομικής άποψης καθώς η αξία της kWh αιχμής είναι πολλαπλάσια της kWh βάσεως. Σε αυτό το πλεονέκτημα των υδροηλεκτρικών σταθμών βασίζεται η κατασκευή υδραντλητικών σταθμών οι οποίες κατά τη διάρκεια της χαμηλής ζήτησης λειτουργούν αντλώντας νερό από τη χαμηλή δεξαμενή και έτσι αποταμιεύουν ενέργεια την οποία θα αποδώσουν κατά τις ώρες αιχμής.

Μειονεκτήματα υδροηλεκτρικών σταθμών

- Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι η μεγάλη διάρκεια που απαιτείται για την κατασκευή τους. Χρειάζονται 5-10 χρόνια για την κατασκευή ενός μεγάλου υδροηλεκτρικού έργου και 1-2 χρόνια για την κατασκευή ενός μικρού υδροηλεκτρικού. Επίσης χρειάζεται και μεγάλη προεργασία για τη συλλογή και επεξεργασία των απαραίτητων υδρολογικών και γεωλογικών στοιχείων στην περιοχή που θα ξεκινήσει το έργο.
- Η ετήσια παραγωγή ενέργειας υφίσταται διακυμάνσεις που σχετίζονται με την ποσότητα των βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων.

- Χρειάζονται μεγάλες δαπάνες σε ένα υδροηλεκτρικό έργο γιατί χρειάζονται μεγάλα δοκιμαστικά έργα που απαιτούν τη διαμόρφωση ολόκληρης της υδραυλικής εγκατάστασης.
- Επιβαρύνεται πολύ το κόστος κατασκευής από το κόστος που απαιτείται για τα έργα μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας. Τα έργα αυτά χρειάζονται γιατί η κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων υδατοπτώσεων και μεγάλων παροχών και γι' αυτό η θέση τους είναι συνήθως πολύ μακριά από τα σημεία κατανάλωσης.
- Τέλος υπάρχουν και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Παρόλο που ένας υδροηλεκτρικός σταθμός δεν εκπέμπει αέριους ρύπους, η κατασκευή και η λειτουργία του έχουν σοβαρές επιπτώσεις σε ανθρώπους, ζώα, φυτά και ολόκληρα οικοσυστήματα. Οι επιπτώσεις αυτές αφορούν την υδρολογία και λιμνολογία της περιοχής, την ποιότητα του νερού, τις πιθανές σεισμικές επιπτώσεις, τα ζώα και τα αλιεύματα και φυσικά τις επιπτώσεις από την ίδια την κατασκευή του έργου.

1.1.3 Σταθμοί ΑΠΕ

Η ανάπτυξη των ΑΠΕ και κυρίως της αιολικής και φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας προωθείται και ενισχύεται με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς, σε όλο τον αναπτυσσόμενο κόσμο. Σημαντική αιτία είναι τα συσσωρευμένα οικολογικά προβλήματα που δημιούργησε η αλόγιστη χρήση, αφενός των συμβατικών καυσίμων, και αφετέρου της πυρηνικής ενέργειας. Στόχος είναι μέχρι το 2020 να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό η διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή και σε συνδυασμό με τη Διεσπαρμένη Παραγωγή να αναπτυχθούν ενεργειακά αποδοτικότερες και φιλικές προς το περιβάλλον μονάδες παραγωγής. Πολιτικά έχει αποφασιστεί ότι το ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα πρέπει να περιέχει ΑΠΕ και νέα καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο, ώστε να εξασφαλίζεται η ενεργειακή ασφάλεια της χώρας. Οι αποφάσεις αυτές πρέπει να εξασφαλίζουν τη λογική του στόχου 20-20-20 (20% αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ, 20% μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, 20% αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας). Ο βασικός στόχος δηλαδή είναι, το ενεργειακό μείγμα να μην είναι ιδιαίτερα ρυπογόνο και οι παλιές ρυπογόνες τεχνολογίες να συνδυαστούν με απορρυπαντικές ώστε να περιοριστεί η αρνητική επίδραση τους στο περιβάλλον.

Για το σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός ΣΗΕ πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι σημαντικοί περιορισμοί λόγω της αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ. Τα βασικότερα προβλήματα στη λειτουργία ενός ΣΗΕ προκαλούνται από τη στοχαστικότητα της παραγωγής από ΑΠΕ, τη δυσκολία πρόβλεψης της και την έως τώρα μη ελεγχόμενη παραγωγή τους. Επίσης τα ηλεκτρικά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με μονοκατευθυντική ροή στους καταναλωτές μέσω των δικτύων διανομής, αλλά με τις διεσπαρμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η κατεύθυνση της ροής της ισχύος μπορεί να αλλάξει στα δίκτυα διανομής επηρεάζοντας έτσι ολόκληρη τη λειτουργία τους.

Οι κυριότεροι τύποι σταθμών από ΑΠΕ είναι:

- Φωτοβολταϊκοί σταθμοί
- Αιολικά πάρκα
- Μικρά υδροηλεκτρικά
- Κυψέλες καυσίμου
- Σταθμοί κυματικής ενέργειας
- Σταθμοί Γεωθερμίας
- Σταθμοί Βιομάζας

Οι **Φωτοβολταϊκοί σταθμοί** παραγωγής ενέργειας μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί έναν ανεξάντλητο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα και αξιόπιστα χωρίς την παρουσία κάποιου χειριστή, γεγονός που αποτελεί πολύ μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής. Φυσικά το όφελος προς το περιβάλλον με τη χρήση αυτών των σταθμών είναι τεράστιο.



Εικόνα 1.9 Φωτοβολταϊκό πάρκο

Τα **Αιολικά πάρκα** αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο μέσω ενός ανεμοκινητήρα και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των γεννητριών.

Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου απαιτείται η γνώση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, η καταγραφή των επικρατέστερων διευθύνσεων στην περιοχή, οι αναταράξεις, ο στροβιλισμός και η τύρβη του ανέμου, καθώς και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους από το έδαφος.



Εικόνα 1.10: Αιολικό πάρκο

Η αιολική ενέργεια είναι πολύ γρήγορα αναπτυσσόμενη μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Χαρακτηρίζεται όμως από έντονη μεταβλητότητα, γεγονός που δημιουργεί προβλήματα στην εξέλιξη και ενσωμάτωση της στο δίκτυο ισχύος. Για να αντισταθμιστεί αυτό το μειονέκτημα απαιτούνται μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής σε χρονικό ορίζοντα μερικών ωρών είτε για τη διαχείριση είτε για το εμπόριο της ενέργειας. Τα μοντέλα αυτά έχουν σκοπό την ασφαλή και οικονομική λειτουργία του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να καλύπτεται πλήρως η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας κάθε στιγμή σε ένα ΣΗΕ. Για το λόγο αυτό ο διαχειριστής του δικτύου κάνει μια πρόβλεψη για τον τρόπο κάλυψης του φορτίου από την προηγούμενη μέρα. Λόγω όμως της μεγάλης μεταβλητότητας του ανέμου, οι προβλέψεις της αιολικής παραγωγής για τις επόμενες π.χ. 24-72 ώρες παρουσιάζουν μεγάλες δυσκολίες.

Τα **μικρά υδροηλεκτρικά** έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα λόγω του ότι οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής βρίσκονται πλέον στο στόχαστρο ορισμένων περιβαλλοντικών και άλλων οργανώσεων λόγω των επιπτώσεων που μπορεί να έχουν στο περιβάλλον. Πολλές χώρες έθεσαν όρια ισχύος για να καθορίσουν τι νοείται ως μικρό υδροηλεκτρικό. Παρόλο αυτά δεν υπάρχει κανένας παγκοσμίως κοινός ορισμός της έκφρασης μικρό υδροηλεκτρικό, καθώς ανάλογα με την κάθε περιοχή και χώρα μπορεί να αλλάζει όσο αναφορά το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος, από μερικά kW έως 50 ή και περισσότερα MW. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων καθώς και στην Ελλάδα το όριο για ένα μικρό υδροηλεκτρικό είναι από 1MW έως 50MW. Τα συστήματα μεταξύ 100 kW ως 1 MW χαρακτηρίζονται ως mini-υδροηλεκτρικά, κάτω των 100 kW micro-υδροηλεκτρικά και εγκαταστάσεις κάτω του 1kW χαρακτηρίζονται ως pico-υδροηλεκτρικά.

Το όριο διάκρισης μεταξύ των μικρών και μεγάλων υδροηλεκτρικών έχει σημασία και από πλευράς διαδικασιών και αδειοδοτήσεων καθώς για τα μικρά υδροηλεκτρικά προβλέπονται διαδικασίες απλούστερες.

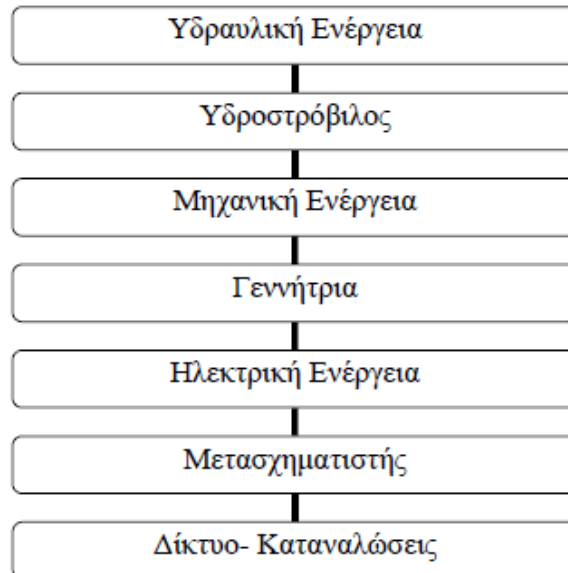
Το μέγεθος της εγκατάστασης δεν είναι πάντα ένας καλός δείκτης του κόστους του έργου. Για παράδειγμα ένα μικρό υδροηλεκτρικό 20 MW, με μικρή στάθμη ύδατος ή μικρή υψομετρική διαφορά έχει μεγάλο κόστος γιατί οι εγκαταστάσεις με χαμηλή υψομετρική διαφορά χρησιμοποιούν πολύ μεγαλύτερους όγκους ύδατος και απαιτούν μεγαλύτερους υδροστροβίλους σε σχέση με τις εγκαταστάσεις με υψηλή υψομετρική διαφορά.

Χρήση: Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα κατασκευάζονται για την αξιοποίηση της ενέργειας των υδάτινων μικρών ποταμών και χειμάρρων, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι επιτυγχάνεται η καλύτερη αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού της χώρας, αφού οι μικρές υδατοπτώσεις αποτελούν συχνά ένα σημαντικό μέρος του δυναμικού αυτού. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η χρήση των μικρών υδροηλεκτρικών ως αντλησιοταμιευτήρες (υδροηλεκτρικά αναστρέψιμης λειτουργίας) ιδίως στα νησιωτικά δίκτυα που παρατηρούνται έντονες μεταβολές του φορτίου στο δίκτυο, ιδιαίτερα την καλοκαιρινή περίοδο. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί αναστρέψιμης λειτουργίας αντλούν νερό από ένα ταμιευτήρα που βρίσκεται ψηλότερα τις ώρες αιχμής ζήτησης και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι εξομαλύνονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις στη ζήτηση και διευκολύνονται οι θερμικές μονάδες να λειτουργούν με περίπου σταθερό φορτίο όπως επιβάλλεται. Το ρόλο του χαμηλού ταμιευτήρα μπορεί να έχει ακόμα και η θάλασσα αν το επιτρέπει η γεωμορφολογία μιας περιοχής.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα διακρίνονται σε εγκαταστάσεις φυσικής ή ρυθμιζόμενης παροχής (με δεξαμενές). Στην Ελλάδα, οι περισσότεροι σε λειτουργία σταθμοί, έχουν μεγάλα φράγματα και λειτουργούν σαν σταθμοί φυσικής ροής.

Δομή και Λειτουργία: Το ΥΗΕ είναι ένα έργο που εκμεταλλεύεται την υδραυλική ενέργεια που υπάρχει σε ένα ποτάμι, μία δεξαμενή, μία λίμνη ή κάποιον άλλο υδάτινο πόρο, και την μετατρέπει σε ηλεκτρική. Η ενέργεια που παράγεται διοχετεύεται στην κατανάλωση που είναι είτε το δίκτυο της ΔΕΗ είτε ίδιες καταναλώσεις είτε συνδυασμός και των δύο. Για να γίνει αυτή η μετατροπή ενέργειας απαιτείται η εγκατάσταση μεγάλου εξοπλισμού που διακρίνεται σε κύριο και βοηθητικό. Τα κυριότερα μέρη από τα οποία αποτελείται το υδροηλεκτρικό έργο είναι η πάνω λίμνη, ο υπερχειλιστής, το υδραυλικό σύστημα παροχής του νερού στην ηλεκτροπαραγωγική μονάδα και μετά πάλι πίσω στην

κοίτη του ποταμιού, η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (υδροστρόβιλος και γεννήτρια), ο υποσταθμός και η κάτω λίμνη.



Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Όπως κάθε τεχνικό έργο, ένας μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός αποτελεί μια παρέμβαση στο περιβάλλον. Η παρέμβαση αυτή προκαλείται τόσο κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου όσο και κατά τη λειτουργία του. Τα μικρά ΥΗΕ έχουν αντιμετωπίσιμες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με άλλα είδη έργων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι επιπτώσεις διαφέρουν σε κάθε εγκατάσταση και εξαρτώνται από το αν το υδροηλεκτρικό συνοδεύεται ή όχι από ταμιευτήρα ή αν είναι ελεύθερας ροής αξιοποιώντας την ορμή κάποιου υδατορεύματος. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν είναι και το αν γίνεται εκτροπή των νερών του υδατορεύματος και αν ναι σε τι ποσοστό καθώς και τα μέτρα που έχουν ληφθεί κατά το σχεδιασμό για την άμβλυνση και αντιμετώπιση των πιθανών επιπτώσεων. Οι πιο πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον από την κατασκευή και τη λειτουργία τους είναι οι εξής:

- Διακοπή της ελεύθερης επικοινωνίας της ιχθυοπανίδας
- Διακοπή του μηχανισμού απαγωγής φερτών υλών
- Ελάττωση της παροχής του υδατορεύματος από το σημείο υδροληψίας έως το σημείο επιστροφής του νερού σε αυτό.

- Καταστροφή δασικής βλάστησης
- Κατάληψη φυσικού χώρου και αλλοίωση φυσικού κάλους
- Ηχορύπανση τόσο κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου όσο και στη διάρκεια λειτουργίας του.

Οι **κυψέλες καυσίμου** είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν απευθείας τη χημική ενέργεια των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια. Το καύσιμο που τις τροφοδοτεί μπορεί να είναι υδρογόνο ή θεωρητικά οποιοδήποτε άλλο συμβατικό καύσιμο που αποτελείται από υδρογονάνθρακες. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλή απόδοση λειτουργίας αλλά το βασικό τους πρόβλημα αυτή τη στιγμή είναι το υψηλό τους κόστος. Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά και αποδοτικά συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούν μία ηλεκτροχημική διαδικασία και όχι καύση για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Εκτός αυτού μπορούν να λειτουργήσουν ως πηγή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση ενός χώρου ή του νερού ή για ψύξη απορρόφησης. Έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες έρευνες που απέδειξαν ότι οι κυψέλες καυσίμου μειώνουν το κόστος για τις υπηρεσίες ηλεκτρισμού 20 με 40%.

Οι **σταθμοί κυματικής ενέργειας** μετατρέπουν την κυματική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η τεχνολογία που απαιτείται για να μετατραπεί η κυματική (παλιρροιακή) ενέργεια σε ηλεκτρισμό μοιάζει πολύ με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε παραδοσιακά υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Τα πιο κατάλληλα μέρη για την κατασκευή σταθμών παραγωγής κυματικής ενέργειας είναι οι στενές εκβολές ποταμών. Η κυματική ενέργεια είναι προβλέψιμη στις τοποθεσίες στις οποίες υπάρχει αξιόλογο δυναμικό. Βασικό μειονέκτημα της είναι η έλλειψη τέτοιων τοποθεσιών και το γεγονός ότι μέσα στη διάρκεια της ημέρας, το χρονικό διάστημα λειτουργίας δεν υπερβαίνει τις 10 ώρες.

Οι **σταθμοί Γεωθερμίας** αξιοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια κατώτερων στρωμάτων της γης. Η Γεωθερμική ενέργεια προέρχεται από το εσωτερικό της γης είτε μέσω ηφαιστειακών εκροών είτε μέσω ρηγμάτων του υπεδάφους, που αναβλύζουν ατμούς και θερμό νερό. Η θερμοκρασία των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης αυξάνεται με το βάθος περίπου με σταθερό ρυθμό και ονομάζεται γεωθερμική βαθμίδα. Η φυσιολογική τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας είναι περίπου $33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Σε μερικές περιοχές όμως η αύξηση γίνεται με πολλαπλάσιο ρυθμό και η γεωθερμική αυτή ανωμαλία αποτελεί το

γεωθερμικό πεδίο, το οποίο και εκμεταλλεύονται οι σταθμοί Γεωθερμίας. Σε περιοχές όπου το περιεχόμενο της γεωθερμικής ενέργειας είναι υψηλό μπορεί να αξιοποιηθεί ο ατμός σε ατμοστροβλικές μονάδες παραγωγής. Έτσι οι σταθμοί γεωθερμίας είναι ουσιαστικά ατμοστροβίλοι και λειτουργούν ως μονάδες βάσης. Οι σταθμοί αυτοί έχουν πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης και πολύ χαμηλό έως μηδενικό κόστος παραγωγής.

Οι **σταθμοί Βιομάζας** χρησιμοποιούν τη βιομάζα ως καύσιμο και δεν χρειάζεται να έχουν κάποιο πρόγραμμα πρόβλεψης της εξόδου τους γιατί αυτή μπορεί να ρυθμιστεί. Λαμβάνουν καύσιμα με κατάλληλη επεξεργασία φυτικών και οργανικών υπολειμμάτων (bio diesel). Όπως και οι συμβατικές μονάδες παραγωγής προβλέπεται να έχουν κάποια μορφή κατανάλωσης καυσίμου και άρα κάποιας μορφής συνάρτησης κόστους. Οι σταθμοί βιομάζας είναι συνήθως ατμοστροβιικοί για αυτό έχουν υψηλή τιμή τεχνικού ελαχίστου σε σχέση με την τιμή του τεχνικού τους μεγίστου και χρειάζονται σημαντικό χρόνο εκκίνησης.

Ως **βιομάζα** ορίζεται η ύλη που έχει βιολογική (οργανική) προέλευση. Πρακτικά περιλαμβάνεται σε αυτήν οποιοδήποτε υλικό προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από τον φυτικό κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο βιομάζα εννοούμε τα φυτικά και δασικά υπολείμματα (καυσόξυλα, κλαδοδέματα, άχυρα, πριονίδια, ελαιοπυρήνες, κουκούτσια), τα ζωικά απόβλητα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα), τα φυτά που καλλιεργούνται στις ενεργειακές φυτείες για να χρησιμοποιηθούν ως μορφή ενέργειας καθώς επίσης και τα αστικά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων, της αγροτικής βιομηχανίας και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων.

Τα πλεονεκτήματα της βιομάζας είναι τα εξής:

- Η βιομάζα είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ότι παρέχει ενέργεια αποθηκευμένη σε χημική μορφή.
- Η αξιοποίηση της μπορεί να γίνει με μετατροπή της σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων, με διάφορες μεθόδους και τη χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας.
- Κατά την παραγωγή και τη μετατροπή της δεν δημιουργούνται οικολογικά και περιβαλλοντολογικά προβλήματα.

Από την άλλη η βιομάζα παρουσιάζει και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα:

- Χαρακτηρίζεται από πολυμορφία, χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, λόγω χαμηλής πυκνότητας και υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα και μεγάλη διασπορά.

- Έτσι τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνεπάγονται επιπλέον δυσκολίες στη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευση της σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Το κόστος μετατροπής της σε πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας παραμένει υψηλό.

1.2 Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει το σύνολο διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης, απ' όπου ξεκινούν και τα δίκτυα διανομής. Επίσης τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης που κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής και μέσης τάσης και δικά τους εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης. Ένα σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει:

- Τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσεως
- Τους υποσταθμούς ζεύξης στους οποίους συνδέονται οι γραμμές υψηλής τάσης και διοχετεύεται ενέργεια προς το σύστημα διανομής.
- Τα κέντρα υπερυψηλής τάσης (KYT) όπου γίνεται προσαρμογή μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς (150kV και 400kV).

Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες και με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ευστάθεια. Αυτό επιτυγχάνεται με μετασχηματισμούς της τάσης, με τους οποίους ανυψώνεται αρχικά η τάση (π.χ. στα 150 kV και στα 400 kV), ώστε στη συνέχεια στα κέντρα διανομής υψηλής τάσης (KYT) να διανεμηθεί σε γραμμές κυρίως των 20kV (ή 15kV) απ' όπου ακολούθως ηλεκτροδοτούνται οι μετασχηματιστές διανομής για να υποβιβαστεί η τάση στα 400V/230V και να διανεμηθεί μέσω γραμμών στους καταναλωτές χαμηλής τάσης. Εκτός των καταναλωτών χαμηλής τάσης υπάρχουν και οι καταναλωτές μέσης τάσης όταν τα φορτία τους ανά φάση είναι μεγαλύτερα από 200A. Η πλειονότητα των γραμμών χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, μεγαλύτερες των 600km, χρησιμοποιούνται ζεύξεις υψηλής τάσεως συνεχούς ρεύματος (HVDC) για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες και η πτώση της τάσης. Εκτός αυτού οι ζεύξεις HVDC έχουν το πλεονέκτημα της δυνατότητας απομόνωσης των συζευγμένων μερών του δικτύου σε περιπτώσεις διαταραχών με στόχο την αποφυγή ολικού black-out.

Η αποδοτικότητα πρέπει να πλησιάζει την τιμή η οποία οδηγεί σε ελάχιστο κόστος μεταφοράς. Η μεταφορά ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση για να αποφεύγονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι ηλεκτρικές απώλειες και κατ' επέκτασης να γίνεται η λειτουργία του συστήματος οικονομικότερα. Το σύστημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας

χρησιμοποιούν διάφορες τάσεις μεταφοράς ανάλογα με την απόσταση και την ποσότητα ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί.

Υπεύθυνος για τη λειτουργία, συντήρηση και ανάπτυξη του ΕΣΜΗΕ (Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας), ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια με ασφάλεια, αποδοτικότητα και αξιοπιστία, είναι ο ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας). Ο διαχειριστής του ελληνικού συστήματος μεταφοράς έχει ως έργο του τη λειτουργία, εκμετάλλευση, διασφάλιση της συντήρησης και μέριμνα για την ανάπτυξη του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας σε ολόκληρη τη χώρα, καθώς και των διασυνδέσεών του με τα άλλα δίκτυα για να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια με ασφάλεια, επάρκεια, οικονομική απόδοση και αξιοπιστία.

Το ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς αποτελείται από γραμμές των 400kV και 150kV, οι οποίες μεταφέρουν ηλεκτρισμό από τα κέντρα παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης και συνδέουν τη χώρα με τις γειτονικές χώρες (κυρίως από το ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας προς τα νότια). Υπάρχουν επίσης υποβρύχια καλώδια που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66kV.

Το σύστημα μεταφοράς δεν σχεδιάστηκε για υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ και αντιμετωπίζει μια σειρά τεχνολογικών προκλήσεων. Καταρχάς πρέπει να γίνεται ρύθμιση της τάσης και παροχή έργου ισχύος. Επίσης πρέπει να παρακολουθείται το φορτίο και να γίνεται ρύθμιση του φορτίου-συχνότητας γιατί πρέπει κάθε στιγμή να τηρείται το ισοζύγιο παραγωγής – ζήτησης. Τέλος πρέπει να γίνεται πρόβλεψη της παραγωγής από ΑΠΕ και του υπολειπόμενου φορτίου. Γενικότερα για την ομαλότερη ενσωμάτωση της υψηλής διείσδυσης των ΑΠΕ απαιτούνται έργα ενίσχυσης του συστήματος μεταφοράς και οι τεχνολογικές δυσκολίες που παρουσιάζονται αντιμετωπίζονται με την εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών.

Από την άλλη πλευρά όμως επειδή πολλές εγκαταστάσεις ΑΠΕ βρίσκονται κοντά στους χρήστες μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς.

1.2.1 Γραμμές Μεταφοράς

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η δυνατότητα μεταφοράς της σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες. Η μεταφορά αυτή είναι απαραίτητη λόγω των μεγάλων αποστάσεων των ενεργειακών κέντρων παραγωγής από τα μεγάλα κέντρα ηλεκτρικής κατανάλωσης. Έτσι για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα σημεία παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης χρησιμοποιούνται οι ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς, το μήκος των οποίων μπορεί να φτάσει μέχρι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Οι γραμμές αυτές εκτός από τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται και για την πολλαπλή σύνδεση των σταθμών παραγωγής με τις καταναλώσεις, ώστε σε περίπτωση που κάποιες μονάδες δεν λειτουργούν οι άλλες μονάδες του δικτύου να καλύπτουν τη ζήτηση ενέργειας.

Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να μεταφέρεται με σταθερή τάση και συχνότητα και τις ελάχιστες δυνατές απώλειες. Η μεταφορά πραγματοποιείται σε υψηλά επίπεδα τάσεως (πάνω από 110 kV) ούτως ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες. Οι γραμμές μεταφοράς δε μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλές τάσεις (220/380V) αλλά φθάνουν μέχρι ορισμένα σημεία, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης του δικτύου. Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης είναι απαραίτητες και οι λόγοι που λειτουργούν σε υψηλή τάση είναι κυρίως οικονομικοί καθώς η ισχύς μεταφέρεται με σχετικά χαμηλή ένταση, οπότε χρειάζονται αγωγοί μικρότερης διατομής με αποτέλεσμα να γίνεται εξοικονόμηση υλικού και μικρότερες απώλειες λόγω μικρότερου ρεύματος και μικρότερες πτώσεις τάσης. Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να μεταφέρεται με σταθερή τάση και συχνότητα και τις ελάχιστες δυνατές απώλειες.

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα ΣΗΕ καθορίζονται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι ο τρόπος κατασκευής των γραμμών (εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια), ο τύπος και τα φυσικά χαρακτηριστικά των αγωγών που χρησιμοποιούνται, το επίπεδο της τάσης λειτουργίας (μέση, υψηλή και υπερυψηλή), τον αριθμό των κυκλωμάτων και τη διάταξη των τριφασικών γραμμών (γραμμές απλού ή διπλού κυκλώματος, γραμμές τριών ή περισσότερων τερματικών σημείων, γραμμές με ενδιάμεσες λήψεις κ.τ.λ.). Όλες αυτές οι λεπτομέρειες πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων αναπαράστασης των γραμμών μεταφοράς, τόσο κατά τη μόνιμη, όσο και κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Τα μοντέλα αυτά σε συνδυασμό με τις σχετικές

διαδικασίες μέτρησης, αποτελούν τα βασικά συστατικά των αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων.

Οι γραμμές μεταφοράς είναι συνήθως εναέριες, καθώς οι υπόγειες γραμμές είναι ακριβότερες. Ωστόσο, υπόγειες γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται σε αστικές περιοχές.

- **Εναέριες γραμμές μεταφοράς**

Στις εναέριες γραμμές μεταφοράς γίνεται η διέλευση των αγωγών πάνω από το έδαφος σε ασφαλές ύψος. Για την εγκατάσταση αυτών των γραμμών απαιτείται μια κατάλληλη ζώνη εδάφους για τη διέλευση τους που θα εκτείνεται σε όλο το μήκος διαδρομής της κάθε γραμμής. Οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης και πολλές γραμμές διανομής μέσης τάσης οδεύουν, συνήθως κατά μήκος των οδών και των λεωφόρων, αλλά οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης χρειάζονται ευρύτερους και ξεχωριστούς διαδρόμους εδάφους από ότι είναι δυνατό να διατεθεί στις πλευρές των οδών και των αρτηριών. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς χρειάζονται τις απαραίτητες συσκευές και εγκαταστάσεις για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στις κατάλληλες συνθήκες. Οι πιο βασικές είναι:

- Οι **αγωγοί** που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια. Στις γραμμές υψηλής τάσης είναι συνήθως τρείς και στις διπλές γραμμές είναι έξι. Για λόγους οικονομίας δε χρησιμοποιείται ουδέτερος αγωγός.
- Οι **στύλοι ή πυλώνες** στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί.
- Οι **μονωτήρες** που αφενός συγκρατούν τους αγωγούς στους στύλους και αφ' ετέρου εξασφαλίζουν τη μόνωση τους προς τη γη.
- Οι **μετασχηματιστές** που μετασχηματίζουν την τάση στους υποσταθμούς μεταφοράς και διανομής.
- Τα **συστήματα ελέγχου και προστασίας**, που ελέγχουν τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών κατά μήκος των γραμμών και τις προστατεύουν από ενδεχόμενες βλάβες που προκαλούνται λόγω πιθανών προβλημάτων στη λειτουργία τους.



Εικόνα 1.11 Πυλώνες υψηλής τάσης



Εικόνα 1.12: Στόλοι 150 kV



Εικόνα 1.13: Στόλοι 400kV AC



Εικόνα 1.14: Μονωτήρες γραμμών μεταφοράς



Εικόνα 1.15: Μονωτήρες πάνω σε στύλους

- **Υπόγειες γραμμές μεταφοράς**

Οι γραμμές αυτές είναι πολύ πιο δαπανηρές από τις εναέριες και γι' αυτό χρησιμοποιούνται μόνο μέσα στις πόλεις όπου η αξία της γης είναι υψηλή ή όπου άλλοι ειδικοί λόγοι, όπως αισθητικοί, ασφαλείας ή δυσχέρειες στην εξερεύνηση ζωνών διελεύσεως, καθιστούν ανεπιθύμητη ή και ανέφικτη τη μεταφορά με εναέριες γραμμές. Οι υπόγειες γραμμές χρησιμοποιούνται για μικρές σχετικά αποστάσεις και χαμηλότερες τάσεις. Κατά τις διαβάσεις των υπόγειων γραμμών κάτω από τα καταστρώματα των οδών, τα καλώδια τοποθετούνται μέσα σε σωλήνες από τσιμέντο, ή σίδηρο (τα τριπολικά) με διάμετρο λίγο μεγαλύτερη από εκείνη των καλωδίων. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η εσκαφή του δρόμου σε περίπτωση βλάβης ή άλλης εργασίας επί των καλωδίων, ενώ ταυτόχρονα μέσω των σωλήνων παρέχεται ενισχυμένη μηχανική προστασία σε αυτά. Οι αγωγοί των καλωδίων είναι πάντα μονωμένοι αγωγοί. Η μόνωση περιβάλλει τους αγωγούς με ορισμένο πάχος μονωτικού υλικού, το οποίο είναι συνήθως μονωτικό χαρτί εμποτισμένο με μονωτικό λάδι, ελαστικό, συνθετική ουσία ή ύφασμα εμποτισμένο με βερνίκι. Η τεχνική της εγκατάστασης καλωδιακών γραμμών κάτω από τα

καταστρώματα των οδών δεν εφαρμόζεται στην Ελλάδα, εκτός από κάποιες ειδικές περιπτώσεις.

- **Σύνθετες γραμμές μεταφοράς**

Οι σύνθετες γραμμές μεταφοράς έχουν ένα τμήμα που αποτελείται από εναέρια γραμμή και το υπόλοιπο από υπόγειο καλώδιο.

Οι γραμμές μεταφοράς διακρίνονται επίσης βάσει του επιπέδου της τάσης λειτουργίας τους.

- **Γραμμές υπερυψηλής τάσης 400kV**

- **Γραμμές υψηλής τάσης 150kV**

- **Γραμμές τάσης 66kV** που χρησιμοποιούνται συνήθως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές

Ένας άλλος παράγοντας διάκρισης των γραμμών μεταφοράς είναι το μήκος τους. Η κατάταξη τους ανάλογα με το μήκος τους εξαρτάται από τις προσεγγίσεις, οι οποίες δικαιολογούνται όσον αφορά στη θεώρηση των παραμέτρων της γραμμής. Έτσι διακρίνονται σε:

- **Γραμμές μικρού μήκους**, των οποίων το μήκος δεν ξεπερνά τα 40km.
- **Γραμμές μεσαίου μήκους**, των οποίων το μήκος βρίσκεται ανάμεσα στα 40km και στα 150km.
- **Γραμμές μεγάλου μήκους**, των οποίων το μήκος ξεπερνά τα 150km.

Οι γραμμές μεταφοράς διαχωρίζονται ακόμα βάσει του αριθμού κυκλωμάτων σε:

- **Γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος**

Τα απλούστερα μέσα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τα κέντρα παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης ενός ΣΗΕ είναι οι εναέριες τριφασικές γραμμές απλού κυκλώματος. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης κατασκευάζονται από γυμνούς αγωγούς που αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (κλώνους χάλυβα). Οι αγωγοί αυτοί αναρτώνται σε πυλώνες μέσω αλυσίδων μονωτήρων από πορσελάνη ή γυαλί.

- **Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος**

Οι γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος (ή αλλιώς διπλές γραμμές) έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς έρευνας, λόγω των ιδιοτήτων που εμφανίζουν τόσο στην προστασία όσο και στην εύρεση της θέσης του σφάλματος. Οι γραμμές αυτές κατασκευάζονται κυρίως εξαιτίας των περιορισμών που επιβάλλονται στη χάραξη καινούριων ζωνών διέλευσης εναέριων γραμμών. Οι γραμμές διπλού κυκλώματος αποτελούνται από δύο ανεξάρτητα τριφασικά κυκλώματα, παράλληλα μεταξύ τους, που

τοποθετούνται στον ίδιο πυλώνα ή σε γειτονικούς πυλώνες που διέρχονται, όμως, από την ίδια ζώνη διέλευσης. Η τάση του κάθε κυκλώματος μπορεί να είναι διαφορετική. Λόγω της γειτνίασης των παράλληλων κυκλωμάτων της διπλής γραμμής, υπάρχει αμοιβαία μαγνητική σύζευξη μεταξύ τους. Η μαγνητική σύζευξη σχετίζεται με την επίδραση που έχει το ρεύμα στο ένα κύκλωμα της γραμμής στη διαμόρφωση της τάσης στο γειτονικό κύκλωμα. Έτσι η τάση σε κάθε κύκλωμα της γραμμής δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το ρεύμα που το διαρρέει.

- **Γραμμές μεταφοράς με πολλά τερματικά σημεία και γραμμές με ενδιάμεσες λήψεις.**

Πολύ συχνά, οικονομικοί και περιβαλλοντικοί λόγοι επιβάλλουν στα σύγχρονα ΣΗΕ τη χρήση γραμμών μεταφοράς πολλών σημείων (multi-terminal lines) ή γραμμών με ενδιάμεσες λήψεις (tapped lines). Ανάλογα με τον αριθμό των τερματικών σημείων διακρίνονται γραμμές τριών, τεσσάρων ή περισσότερων σημείων.

1.2.2 Υποσταθμοί ΥΤ/ΜΤ Κέντρα Υπερυψηλής τάσης

Υποσταθμός γενικά ονομάζεται η ηλεκτρική εγκατάσταση στην οποία γίνεται μετασχηματισμός τάσης, η κατανομή ή η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεννήτριες των σταθμών παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια με τάση 15kV ή 20kV. Η τάση των 15 kV ή 20 kV είναι χαμηλή ώστε να μην ενδείκνυται να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις, λόγω μεγάλων απωλειών. Έτσι η τάση ανυψώνεται στα 150 kV ή 400 kV και μετά με τη γραμμή μεταφοράς μεταφέρεται κοντά στους καταναλωτές. Ελάχιστοι καταναλωτές τροφοδοτούνται με τάση 150 kV (π.χ. Πελάτες Υψηλής Τάσης). Η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται με μέση τάση στους μεγάλους καταναλωτές, όπως είναι οι βιομηχανίες, ενώ στους μικρούς καταναλωτές, όπως είναι τα σπίτια, τα καταστήματα και οι βιοτεχνίες, διανέμεται με χαμηλή τάση. Έτσι υπάρχει ανάγκη και άλλων μετασχηματισμών από Υψηλή τάση(Υ.Τ) ή Υπερυψηλή τάση(Υ.Υ.Τ) σε Μέση τάση (Μ.Τ) και μετά από Μ.Τ. σε χαμηλή τάση Χ.Τ. Οι γραμμές μεταφοράς αναχωρούν από τους υποσταθμούς και καταλήγουν σε αυτούς, οι οποίοι και αποτελούν κυρίως τους κόμβους του δικτύου.

Οι υποσταθμοί μεταφοράς ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν διακρίνονται σε:

- **Υποσταθμούς ανυψώσεως** οι οποίοι βρίσκονται κοντά στους σταθμούς παραγωγής και έχουν σαν λειτουργία την ανύψωση της τάσεως παραγωγής στην τάση μεταφοράς.
- **Υποσταθμούς υποβιβασμού** που προορίζονται για τον υποβιβασμό της τάσης μεταφοράς των 150 ή 400 kV στη μέση τάση διανομής 15 ή 20 kV.
- **Υποσταθμούς ζεύξεως** στους οποίους συνδέονται απλώς γραμμές (υψηλής τάσης) χωρίς απαραίτητα να γίνεται κάποιος μετασχηματισμός τάσεως.

Συνήθως όμως οι Υ/Σ είναι μικτοί, δηλαδή ανυψώσεως και ζεύξεως συγχρόνως ή υποβιβασμού και ζεύξεως.

Οι υποσταθμοί μπορεί να είναι υπαίθριοι ή εσωτερικού χώρου.

- **Εναέριοι Υποσταθμοί** κατασκευάζονται πάνω σε στύλους και χρησιμοποιούνται εκεί όπου ο χώρος και το περιβάλλον το επιτρέπουν. Συνήθως χρησιμοποιούνται εκεί που οι ηλεκτρικές γραμμές είναι εναέριες. Το πλεονέκτημα τους είναι η απλότητα και η φθηνή κατασκευή τους.

- **Επίγειοι Υποσταθμοί**

- **Επίγειοι Υ/Σ εσωτερικού τύπου** κατασκευάζονται εκεί όπου το μέγεθος ισχύος ή ο χώρος δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση εναέριου Υ/Σ. Τοποθετούνται είτε μέσα σε κτίρια που υπάρχουν είτε μέσα σε ιδιαίτερα οικοδομήματα, είτε μέσα σε ειδικά μεταλλικά περίπτερα. Πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα στους χώρους αυτούς ώστε η θερμοκρασία να μη φθάσει σε επικίνδυνα όρια για τη λειτουργία του μετασχηματιστή και των υπόλοιπων ηλεκτρικών συσκευών και καλωδίων.
- **Επίγειοι Υ/Σ υπαίθριοι** κατασκευάζονται εκεί όπου χρειάζεται ισχύς μεγαλύτερη από τη συνηθισμένη των εναέριων Υ/Σ και οι τοπικές συνθήκες επιτρέπουν την υπαίθρια εγκατάσταση των μηχανημάτων του Υ/Σ. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομούνται οι δαπάνες που θα χρειαζόταν για την κατασκευή κτιρίου.

- **Υπόγειοι Υποσταθμοί** κατασκευάζονται κάτω από την επιφάνεια της γης. Τέτοιοι Υ/Σ τοποθετούνται σε κεντρικά σημεία πόλεων και σε θέσεις που δεν είναι εύκολη η κατασκευή υπέργειου Υ/Σ. Για την εγκατάσταση τους χρειάζεται μια υπόγεια οικοδομή και ως εκ τούτου κατασκευάζονται εκεί όπου οι συνθήκες του υπεδάφους το επιτρέπουν. Οι τοίχοι, το δάπεδο και η οροφή του υπογείου κτιρίου πρέπει να κατασκευάζονται ανθεκτικά και στεγανά. Επίσης είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται, κατά την κατασκευή τους, η κυκλοφορία του αέρα χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να μπουν μέσα νερά.

Τα **Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (KYT)** αποτελούν τα σημεία σύνδεσης του Συστήματος 400kV με το Σύστημα 150 kV. Τα KYT έχουν έναν ή περισσότερους αυτομετασχηματιστές τριών επιπέδων τάσης και κάποιοι από αυτούς εξυπηρετούν παράλληλα και ανάγκες ανύψωσης τάσης από τις μονάδες παραγωγής προς το σύστημα 400 kV.

Η ισχύς η οποία μπορεί να μεταφερθεί με μια γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της τάσεως αυτής, επομένως είναι προφανής ο ρόλος των υπερυψηλών τάσεων στην επίτευξη μεγάλων ισχύων μεταφοράς. Επιπλέον η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας με υπερυψηλές τάσεις μειώνουν τις απώλειες και αυτό οδηγεί στην οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς.



Εικόνα 1.16: Κ.Υ.Τ Λάρισσας (Πηγή Δ.Ε.Η Α.Ε)

1.3 Δίκτυο Διανομής

Με τον όρο διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Οι γραμμές μεταφοράς Υ.Τ δε μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλές τάσεις (220/380V) αλλά φθάνουν μέχρι ορισμένα σημεία, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης του δικτύου. Από αυτά τα σημεία, στα οποία βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς αρχίζουν οι γραμμές διανομής που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στο επίπεδο των καταναλωτών χαμηλής τάσης.

Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν:

- Τις γραμμές διανομής μέσω των οποίων η ενέργεια φτάνει στους καταναλωτές.
- Τους υποσταθμούς (διανομής) υποβιβασμού τάσης, οι οποίοι συνδέουν το σύστημα διανομής με το σύστημα μεταφοράς.
- Το σύστημα διανομής χαμηλής τάσης

Οι γραμμές διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και οι γραμμές μεταφοράς, μπορεί να είναι είτε εναέριες είτε υπόγειες.

Στην συνέχεια, γίνεται μια σύντομη περιγραφή των δικτύων διανομής, όπως αυτά σχεδιάζονται και κατασκευάζονται στον ελλαδικό χώρο. Από τον μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150 kV/20 kV) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20 kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται «γραμμές κορμού». Καθεμία από αυτές τις γραμμές διακλαδίζεται σε ορισμένες γραμμές, που αφορούν την ηλεκτροδότηση (τμημάτων της ευρύτερης περιοχής) μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ) ή ασφαλειών, οι οποίες ονομάζονται επίσης γραμμές κορμού. Οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΑΕ διακλαδίζονται με τη σειρά τους σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης τάσεως σε χαμηλή τάση (20 kV / 400 V, 230 V). Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους συνήθως μέχρι 400 kV/A και σε εσωτερικού χώρου (συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών) μεγαλύτερης ισχύος από 400 kVA. Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσεως ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών ή τριπολικών αποζευκτών, ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων. Για

λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης γραμμών μέσης τάσης (σε περιπτώσεις π.χ. πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και εργασιών αποκατάστασης βλαβών) υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικοί ασφαλειοαποξεύκτες και τριπολικοί αποξεύκτες μη εντασσόμενοι σε υπαίθριους υποσταθμούς.

Οι διακοπές ηλεκτροδότησης των καταναλωτών οφείλονται σε μεγάλο ποσοστό σε σφάλματα στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης. Η χρήση διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ) και αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) για την προστασία γραμμών διανομής μέσης τάσης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τους δείκτες αξιοπιστίας του δικτύου. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας των ΑΔΕ και ΔΑΕ, οι οποίοι όταν εντοπίσουν σφάλμα προς γη ή φάση με χρονική διάρκεια μεγαλύτερη από ένα καθορισμένο όριο διακόπτουν το κύκλωμα και στην συνέχεια ξανακλείνουν για να επαναφέρουν το κύκλωμα. Αν το σφάλμα εξακολουθεί να υπάρχει, ο διακόπτης επαναλαμβάνει τον κύκλο «άνοιγμα- κλείσιμο» για ακόμα δυο φορές και στην συνέχεια διακόπτει οριστικά την τροφοδότηση της γραμμής. Οι διακόπτες πραγματοποιούν είτε δυο γρήγορες και δυο αργές λειτουργίες είτε μια γρήγορη και τρεις αργές λειτουργίες και η χρονική διάρκεια ανάμεσα στις λειτουργίες είναι 1 – 2 δευτερόλεπτα. Η πλειονότητα των σφαλμάτων σε εναέρια δίκτυα είναι παροδικά και διαρκούν το πολύ λίγα δευτερόλεπτα. Έτσι, τόσο ο αυτόματος διακόπτης ελαίου όσο και ο διακόπτης αυτόματης επαναφοράς αποτρέπουν την διακοπή ηλεκτροδότησης μιας γραμμής εξαιτίας ενός παροδικού σφάλματος, που μπορεί να συμβεί π.χ. κατά την πτώση ενός κλαδιού δέντρου πάνω στην γραμμή κατά την πτώση προς την γη.

Η παροχή χαμηλής τάσης (400 V, 230 V) σε πελάτες χαμηλής τάσης γίνεται μέσω γραμμών χαμηλής τάσης (από γυμνούς αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια) που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης (ασφαλειοκιβώτιο) του υποσταθμού. Η χρήση συνεστραμμένων καλωδίων είναι προτιμότερη καθώς σε περίπτωση αποκοπής του καλωδίου, η πιθανότητα ηλεκτροπληξίας είναι μειωμένη, όπως μειωμένη είναι και η πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς, έναντι της αποκοπής γυμνών αγωγών.

Η παροχή μέσης τάσης σε καταναλωτές αφορά απορροφημένες εντάσεις ρεύματος άνω των 200Α ανά φάση, όπως συμβαίνει συνήθως σε βιομηχανίες, νοσοκομεία άνω των 100 κλινών, μεγάλα ξενοδοχεία, κ.λπ.

Στη μέση τάση και στη χαμηλή τάση χρησιμοποιούνται ξύλινοι στύλοι και μερικές φορές στις πόλεις, τσιμεντένιοι (και σπανιότερα μεταλλικοί). Τα υλικά και η εγκατάσταση κάθε ξύλινου στύλου είναι τυποποιημένα. Οι ξύλινοι στύλοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την

ανάρτηση των εναερίων δικτύων μέσης τάσης. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό κόστος τους και στην ευκολότερη συγκριτικά μεταφορά τους σε δυσπρόσιτα μέρη.



Εικόνα 1.17: Ξύλινος Στόλος γραμμών μεταφοράς

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) δημιουργούν προβλήματα στο σύστημα διανομής. Τα ηλεκτρικά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν την ενέργεια με μονοκατευθυντική ροή στους καταναλωτές, αλλά η παραγωγή ενέργειας από διεσπαρμένες πηγές ΑΠΕ μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση της ροής ισχύος στα δίκτυα διανομής επηρεάζοντας ολόκληρη τη λειτουργία του δικτύου διανομής.

Συγκεκριμένα οι ΑΠΕ προκαλούν αλλαγές στο επίπεδο και την ποιότητα της τάσης των δικτύων, αλλάζουν το επίπεδο βραχυκύκλωσης με αποτέλεσμα να τροποποιείται η προστασία του δικτύου. Γενικά με τις ΑΠΕ επηρεάζεται η ευστάθεια του συστήματος γιατί η παραγωγή από ΑΠΕ δεν είναι εύκολα ελεγχόμενη.

2.Κυριότερες Τεχνολογίες Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναλυτική περιγραφή των βασικότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Θα γίνει ανάλυση των φυσικών φαινομένων και των αρχών πάνω στις οποίες στηρίζεται η παραγωγή καθώς και στα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε μονάδας παραγωγής. Αυτά τα χαρακτηριστικά όμως έχουν και κάποια προβλήματα προσαρμοστικότητας και ευελιξίας όσον αφορά τη διείσδυση τους στα υπάρχοντα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν όμως σχετικές αναφορές που αντιμετωπίζουν τα προβλήματα αυτά και δίνουν λύσεις ώστε οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να είναι βιώσιμες αλλά και ποιοτικές.

2.1 Ανεμογεννήτριες

Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτελεί μια πρακτική που βρίσκει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι τα ιστιοφόρα και οι ανεμόμυλοι. Σήμερα, για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι ανεμογεννήτριες. Οι Ανεμογεννήτριες (Α/Γ) είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιούνται για την πλήρη κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών. Το ρεύμα που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες είτε καταναλώνεται επιτόπου, είτε εγχέεται και διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να καταναλωθεί αλλού. Σε κάποιες περιπτώσεις που η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι περισσότερη από τη ζητούμενη, αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί αργότερα όταν η ζήτηση γίνει μεγαλύτερη από την παραγωγή.

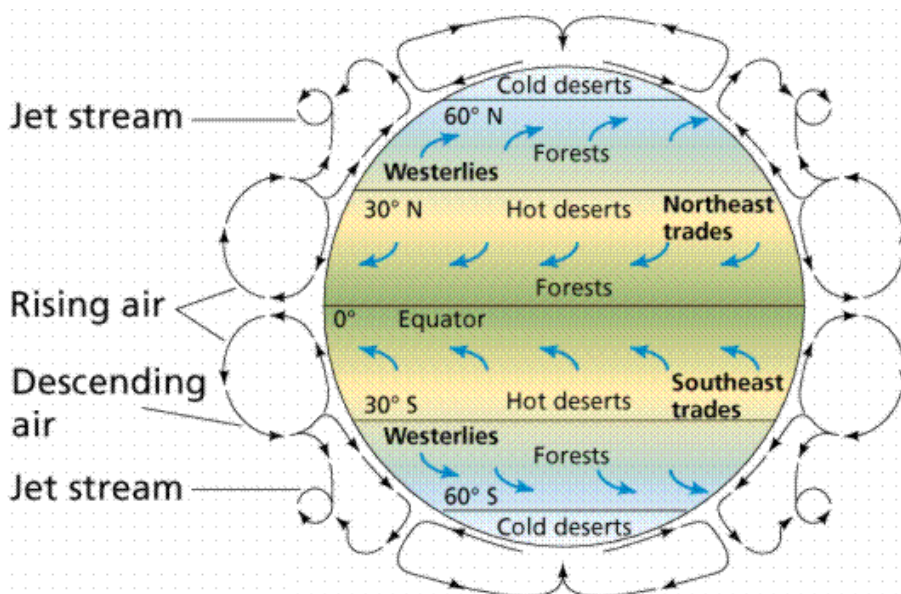
Η Ελλάδα διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της Κρήτης, της Πελοποννήσου, της Ευβοίας και στα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτές τις περιοχές υπάρχουν και τα περισσότερα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών σε βέλτιστη διάταξη για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

Η αιολική ενέργεια είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, Η εκμετάλλευση του υψηλού της δυναμικού στη χώρα μας, σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών που ενσωματώνεται στις σύγχρονες αποδοτικές ανεμογεννήτριες, έχει τεράστια σημασία για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Τα αιολικά πάρκα έχουν ενταχθεί σε πολλά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργούν παράλληλα με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Όμως η λειτουργία τους έχει αυξήσει σημαντικά την πολυπλοκότητα της λειτουργίας των συστημάτων και τις επιπτώσεις τους στην ασφάλεια και την αξιοπιστία τους. Αυτό συμβαίνει γιατί σε ένα ΣΗΕ η λειτουργία πολλών αιολικών πάρκων μπορεί να προκαλέσει δυναμικά μη ευσταθείς καταστάσεις λειτουργίας εξαιτίας της τυχαίας μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου που μπορεί να προκαλέσει πολύ σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος των ανεμογεννητριών και της περιορισμένης δυνατότητας τους, ιδιαίτερα αυτών που είναι συνδεδεμένες απευθείας στο σύστημα μεταφοράς.

2.1.1 Στοχαστική φύση του ανέμου και εκτίμηση αιολικής παραγωγής

Η κίνηση των αέριων μαζών της ατμόσφαιρας λόγω της συνεχούς επίδρασης των μεταβολών των ατμοσφαιρικών πιέσεων δημιουργούν τους ανέμους. Τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για να προσδιοριστεί ο άνεμος είναι η διεύθυνση και η ταχύτητα του. Η περιστροφή της γης και η ηλιακή ακτινοβολία είναι τα δύο βασικά φαινόμενα που δημιουργούν τον άνεμο. Πιο αναλυτικά λόγω της θέσης της γης ως προς τον ήλιο, στον ισημερινό είναι πιο ζεστή ενώ στους πόλους πιο ψυχρή. Ο θερμός αέρας όμως είναι μικρότερης πυκνότητας, έτσι οι ψυχροί επιφανειακοί άνεμοι του πόλου κατευθύνονται προς τον ισημερινό προκειμένου να αντικαταστήσουν τον ελαφρύτερο θερμό αέρα. Στη συνέχεια αυτός ο θερμός αέρας ανεβαίνει σε ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα και από εκεί κινείται προς τους πόλους πίσω, ανάποδα. Όσο αναφορά την περιστροφή της γης και το πώς επιδρά στις κινήσεις της ατμόσφαιρας, η αδράνεια στρέφει τον ψυχρό επιφανειακό αέρα προς τα δυτικά και τον θερμό των ανωτέρων στρωμάτων προς τα ανατολικά. Γι' αυτό το λόγο στα μεσαία και μεγάλα γεωγραφικά μήκη, λόγω της περιστροφής και ενώ θεωρητικά ο άνεμος πνέει από τις ζώνες υψηλής προς χαμηλής πίεσης, γίνεται παράλληλη με τις ισοβαρείς αντί να είναι κάθετη προς αυτές. Έτσι στο βόρειο ημισφαίριο ο άνεμος περιστρέφεται γύρω από τις περιοχές χαμηλής πίεσης με φορά αντίθετη αυτής του ρολογιού και στις περιοχές υψηλής πίεσης με φορά αυτής των δεικτών. Ακριβώς αντίθετη λογική υπάρχει στο νότιο ημισφαίριο.



Εικόνα 2.1: Περιστροφή ανέμου στα ημισφαίρια της γης

Όλα τα παραπάνω στοιχεία που αναφέρθηκαν συντελούν γενικά στη μεταβολή της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χρονιάς. Είναι αξιοσημείωτο

ότι κατά τη χειμερινή περίοδο η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες εποχές. Φυσικά μεταβολές έχουμε και κατά τη διάρκεια του 24ωρου. Έντονη μεταβλητότητα παρουσιάζεται και στις παραθαλάσσιες περιοχές καθώς στις περιοχές αυτές η ειδική θερμότητα της ξηράς είναι διαφορετική από αυτήν της θάλασσας. Την ημέρα υπάρχει η θαλάσσια αύρα από τη θάλασσα προς τη ξηρά ενώ το βράδυ η απόγειος αύρα από τη ξηρά προς τη θάλασσα. Τα ίδια μπορεί να συμβαίνουν και στις ορεινές περιοχές με τα καθοδικά ρεύματα.

Γενικά η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια μικρών χρονικών διαστημάτων, ακόμα και της τάξης των δευτερολέπτων. Οι ταχύτητες του ανέμου εξαρτώνται από το ανάγλυφο της περιοχής και φυσικά ποικίλλουν ανάλογα με την εποχή και την ημέρα. Για να θεωρηθεί μια περιοχή κατάλληλη ώστε να αξιοποιηθεί αιολικά θα πρέπει η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, μετρημένη σε 10 μέτρα ύψος από το έδαφος της γης, να είναι μεγαλύτερη από 4 m/s. Στην Ελλάδα οι καλύτερες τιμές επιτυγχάνονται στην Κρήτη και στα νησιά του Αιγαίου.

Ο άνεμος είναι υψηλής ποιότητας πηγή ενέργειας από θερμοδυναμική άποψη και αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και μηχανικής γενικά. Υπάρχουν κάποιες αρνητικές επιπτώσεις όπως είναι οι διαταραχές από λήψη σημάτων ραδιοφώνου, δορυφόρου και τηλεόρασης οι οποίες όμως έχουν ξεπεραστεί από τα υλικά χρήσης και τα σημεία τοποθέτησης τους. Το κύριο όμως μειονέκτημα της χρήσης αιολικής ενέργειας είναι η στοχαστικότητα του ανέμου καθώς είναι αραιή μορφή ενέργειας και ουσιαστικά απρόβλεπτη. Αυτό φυσικά έχει επιπτώσεις και στο συνολικό κόστος παραγωγής. Υπάρχει επίσης και η διακύμανση γιατί υπάρχουν έντονες αλλαγές ταχύτητας εποχιακά αλλά και σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη αποθήκευσης και ύπαρξης συμπληρωματικής πηγής ενέργειας. Επειδή λοιπόν ο άνεμος είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος τόσο με το χρόνο όσο με το ύψος και το έδαφος χρειάζονται αναλυτικές μετρήσεις ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Η ταχύτητα συνήθως μετράται με τη χρήση κυπελλοφόρων ή ελικοφόρων ανεμόμετρων ενώ η διεύθυνση με τους ανεμοδείκτες ακριβείας. Για κάθε περιοχή απαιτείται περίοδος μετρήσεων από 6 μήνες έως ένα χρόνο ενώ το ύψος μέτρησης είναι συνήθως τα 10 μέτρα από το έδαφος.

Ταχύτητα του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο μέγεθος που περιγράφεται γενικά από τη σχέση:

$$U_w(t) = \bar{U}_w + U(t) \quad (2.1)$$

Η σχέση αυτή συνδέει τη **στιγμιαία ταχύτητα** $U_w(t)$ με τη **μέση ταχύτητα** \bar{U}_w και την **τυρβώδη συνιστώσα της ταχύτητας** $U(t)$.

Η **τυρβώδης συνιστώσα της ταχύτητας** ή αλλιώς η **τύρβη** του ανέμου εκφράζει τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου γύρω από τη μέση τιμή της. Οφείλεται στις ταχείες διακυμάνσεις του ανέμου όπως για παράδειγμα σε ακραία καιρικά φαινόμενα. Αποτελεί σημαντικό παράγοντα που λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης μιας Α/Γ, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τόσο το μηχανικό όσο και το ηλεκτρικό σύστημα ελέγχου της Α/Γ. Όταν ο αέρας παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις καταπονούνται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας για χρονικό διάστημα μερικών δευτερολέπτων, όσο δηλαδή διαρκεί το φαινόμενο μέχρι να αναλάβει κατάλληλος εξοπλισμός τον έλεγχο προστασίας των μηχανικών μερών της Α/Γ. Επιπλέον για το ίδιο χρονικό διάστημα εμφανίζεται πλεονάζον ηλεκτρικό φορτίο λόγω της στιγμιαίας αύξησης της μηχανικής ισχύος του ανέμου, το οποίο παραλαμβάνεται από κατάλληλο ηλεκτρικό κύκλωμα (απορριπτικό φορτίο) για την προστασία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων της Α/Γ. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της τυρβώδους συνιστώσας είναι ότι επηρεάζεται άμεσα από το ανάγλυφο του εδάφους καθώς πολλαπλασιάζεται μετά την πρόσκρουση της σε εμπόδια όπως κτίρια, λόφοι, δέντρα κ.λπ.

Επειδή όμως υπάρχει συνεχής μεταβλητότητα παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον το σχετικά σταθερό μέγεθος της **Μέσης ταχύτητας** που δίνεται από τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (2.2)$$

Στο παρόν κεφάλαιο με τον όρο ταχύτητα του ανέμου θα εννοείται η μέση ταχύτητα, διάρκειας συνήθως από 10 λεπτά έως 1 ώρα. Δηλαδή η τυρβώδης συνιστώσα της στιγμιαίας ταχύτητας του ανέμου δε λαμβάνεται υπόψη.

Μεταβολή της Ταχύτητας με το Ύψος και την Τραχύτητα του Εδάφους

Στο κατώτερο μέρος της ατμόσφαιρας, μεταξύ 500 και 1000 μέτρων από το έδαφος, υπάρχουν έντονες αλλαγές στα χαρακτηριστικά του ανέμου. Αυτό το τμήμα ονομάζεται οριακό στρώμα και η τραχύτητα του εδάφους (βλάστηση, κτίρια κ.λπ.) με τις καιρικές συνθήκες καθορίζουν το πάχος του. Μέσα στο οριακό στρώμα η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται σημαντικά συναρτήσει του ύψους και της τραχύτητας του εδάφους.

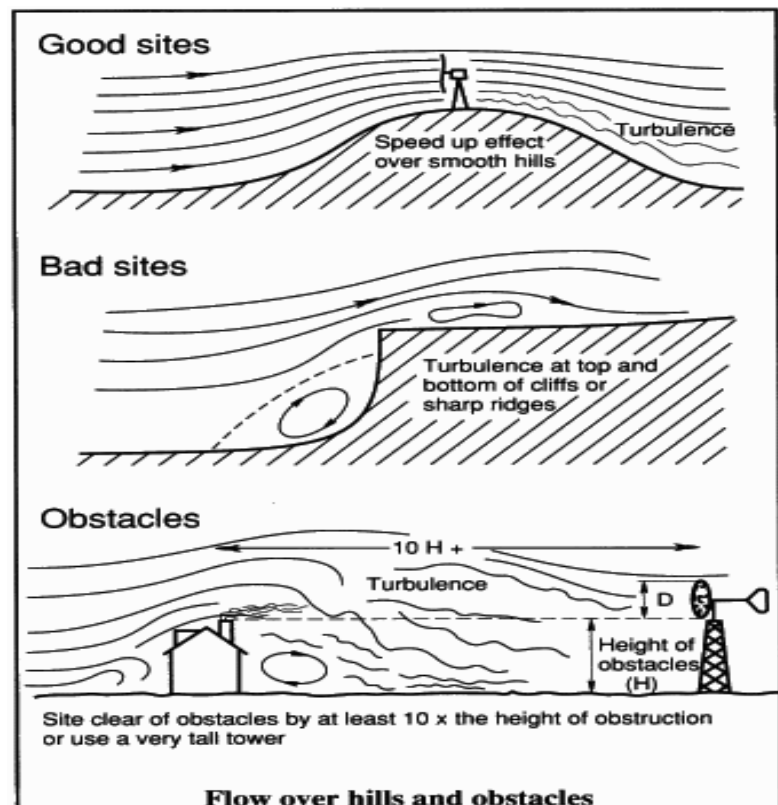
Αν πραγματοποιηθεί μέτρηση της ταχύτητας σε ένα ύψος (π.χ με ανεμόμετρο) τότε αυτή μπορεί να αναχθεί σε διαφορετικό ύψος με την εμπειρική σχέση (γνωστή και ως εκθετικό νόμο):

$$\frac{U_H}{U_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^a \quad (2.3)$$

Όπου U_H είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H , U_0 είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H_0 και a είναι ο συντελεστής τριβής που εκφράζει το είδος του χώρου στον οποίο εξετάζεται το μέγεθος του αέρα. Οι τιμές του δίνονται εμπειρικά στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος Εδάφους	Συντελεστής Τριβής a
Λείο έδαφος, ήρεμη θάλασσα	0,1
Ψηλό χορτάρι	0,15
Ψηλοί σωροί, εμπόδια και θάμνοι	0,2
Δάσος, πολλά δέντρα και θάμνοι	0,25
Μικρή πόλη με δέντρα και δάση	0,3
Μεγάλη πόλη με ψηλά κτίρια	0,4

Η παραπάνω αναγωγή των ταχυτήτων είναι χρήσιμη στην περίπτωση που είναι γνωστή η ταχύτητα του ανέμου σε ένα συγκεκριμένο ύψος (π.χ στα 10m) οπότε είναι αναγκαίο αυτή να αναχθεί στο ύψος της πλήμνης μιας Α/Γ, (το συγκεκριμένο ύψος αποτελεί ύψος αναφοράς για όλους τους υπολογισμούς).



Εικόνα 2.2: Ροή του ανέμου πάνω από λόφους και εμπόδια

Οι καλύτερες θέσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας είναι στην κορυφή ομαλών λόφων με μέτριες και προοδευτικές κλίσεις, χωρίς επίπεδη επιφάνεια, ενώ γενικά θα πρέπει να προηγείται επίπεδη επιφάνεια ή θάλασσα για εκατοντάδες μέτρα. Η τοπογραφία καθορίζει την επιβράδυνση, την επιτάχυνση και τις παρεκκλίσεις του ανέμου. Στις περιοχές αυτές η αύξηση της ταχύτητας μπορεί να φτάσει και το 60-80%.

Στατιστική Κατανομή της Ταχύτητας του Ανέμου

Όπως προαναφέρθηκε η φύση του ανέμου είναι στοχαστική. Η ταχύτητα ποικίλλει με το χρόνο και την εποχή. Για αυτό η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται από τη συνάρτηση πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου και όχι από τη μέση τιμή του σε μια περιοχή. Λόγω της έλλειψης ικανοποιητικών ιστορικών στατιστικών δεδομένων, καθώς απαιτούνται στοιχεία τουλάχιστον μιας δεκαετίας, για την ταχύτητα του ανέμου σε μία περιοχή, γίνεται χρήση στατιστικών κατανομών για τον προσδιορισμό της και συγκεκριμένα η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull, η οποία προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την κατανομή του ανέμου. Σύμφωνα λοιπόν με την κατανομή Weibull οι πιθανότητες εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου δίνονται από τη σχέση:

$$f(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^k} \quad (2.4)$$

Όπου:

$$0 \leq U \leq \infty,$$

k είναι η **παράμετρος μορφής** της κατανομής και c η **παράμετρος κλίμακας**

Εξ ορισμού η τιμή UdU ισούται με την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται στο διάστημα μεταξύ U και $U + dU$, οπότε:

$$\int_0^\infty f(U) dU = 1 \quad (2.5)$$

Επιπλέον η **Μέση (Ετήσια) Ταχύτητα του Ανέμου** υπολογίζεται από την παραπάνω κατανομή ως:

$$\bar{U} = \int_0^\infty U f(U) dU \quad (2.6)$$

Η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται εντός συγκεκριμένου διαστήματος τιμών, υπολογίζεται από την **αθροιστική (σωρευτική) συνάρτηση πιθανότητας**:

$$F(U \leq U_x) = \int_0^{U_x} f(U) dU \quad (2.7)$$

η οποία για την κατανομή Weibull δίνεται από τη σχέση :

$$F(U \leq U_x) = 1 - e^{-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k} \quad (2.8)$$

και ισοδύναμα:

$$F(U \geq U_x) = e^{-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k} \quad (2.9)$$

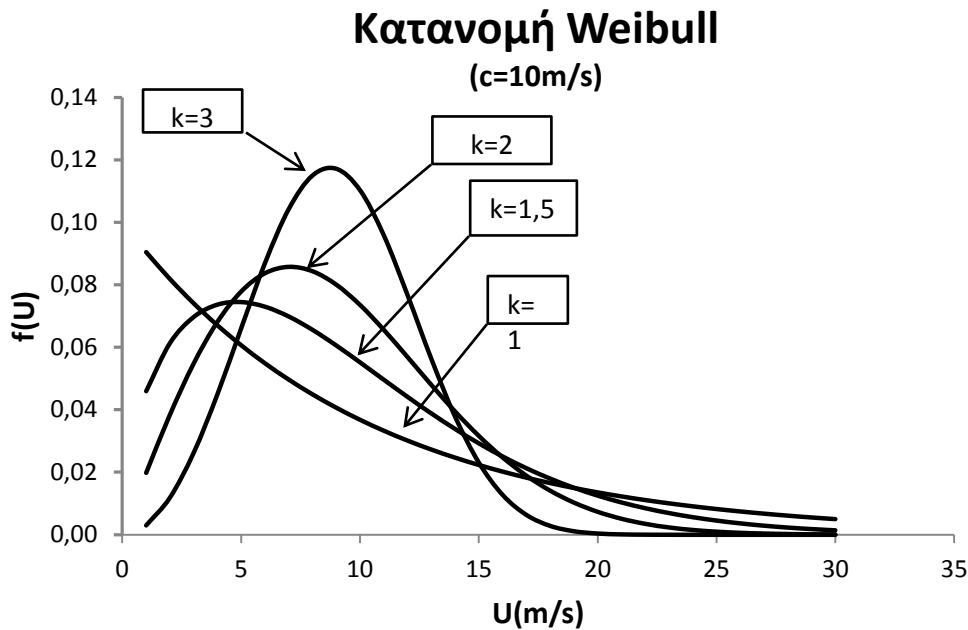
για $0 \leq U \leq \infty$

Γενικότερα αποδεικνύεται ότι :

$$F(U_1 \leq U \leq U_2) = F(U_2) - F(U_1) = e^{-\left(\frac{U_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{U_2}{c}\right)^k} \quad (2.10)$$

Παράμετρος Μορφής k

Η μορφή της συνάρτησης $f(U)$ καθορίζεται από την τιμή της παραμέτρου μορφής k . Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η συνάρτηση κατανομής της ταχύτητας του ανέμου για 4 διαφορετικές τιμές της παραμέτρου k .



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα συνάρτησης κατανομής ταχύτητας Weibull

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της παραμέτρου προκαλεί ταυτόχρονα αύξηση του ύψους της κατανομής και μετατόπιση σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Υπάρχουν ορισμένες ειδικές τιμές της παραμέτρου με ιδιαίτερο ενδιαφέρον:

- Για $k=1$ από την (2.4), προκύπτει η Εκθετική Κατανομή:

$$f(U) = \frac{1}{c} e^{-\frac{U}{c}} \quad (2.11)$$

- Για $k=2$ από τη (2.4) προκύπτει η Κατανομή Rayleigh

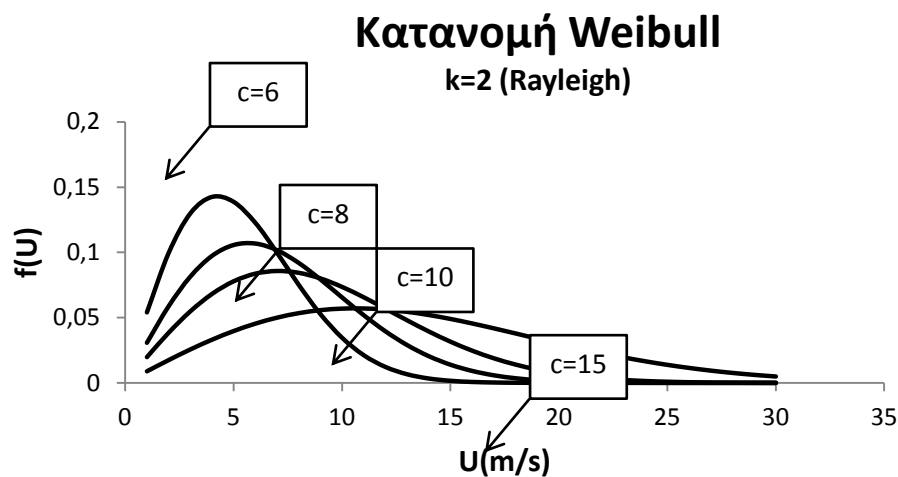
$$f(U) = \frac{2}{c^2} e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^2} \quad (2.12)$$

- Για $k > 3$ η κατανομή προσεγγίζει την Κανονική Κατανομή (Gauss)

Συνήθεις τιμές της παραμέτρου k είναι μεταξύ 1,5 και 2,5, ενώ συχνά λαμβάνεται $k=2$ δηλαδή χρησιμοποιείται η κατανομή Rayleigh. Στον ελλαδικό χώρο συνήθως λαμβάνονται τιμές μεταξύ 1,5 και 2.

Παράμετρος κλίμακας c

Για δεδομένη τιμή της παραμέτρου μορφής (k), η παράμετρος κλίμακας (c) καθορίζει τη μέση τιμή της ταχύτητας στη θέση που εξετάζεται. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας Rayleigh ($k=2$), για διάφορες τιμές της παραμέτρου κλίμακας. Παρατηρούμε ότι η αύξηση της c μετατοπίζει τις καμπύλες σε υψηλότερες ταχύτητες.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα κατανομής ταχύτητας Rayleigh

Στην πράξη οι ταχύτητες ανέμων που εμφανίζονται σε μία περιοχή, υπολογίζονται με τη λήψη συστηματικών μετρήσεων, οι οποίες διαρκούν ικανό χρόνο (άνω του έτους). Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται υπόψη και οι τοπικές διακυμάνσεις του ανέμου καθώς και ιδιαιτερότητες της περιοχής. Από την επεξεργασία των μετρήσεων προκύπτει η Διακριτή Κατανομή ταχυτήτων, της μορφής $F_i = F(U_i)$, για $i = 1, \dots, N_v$ όπου N_v το πλήθος των διακριτών τιμών ταχύτητας του ανέμου (το πλήθος της διακριτής κατανομής που μετρήθηκε). Η τιμή F_i εκφράζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να ανήκει σε ένα διάστημα γύρω από την τιμή U_i . Η πιθανότητα F_i είναι:

$$F_i = F(U_i) = \int_{U_i - 0.5\Delta U}^{U_i + 0.5\Delta U} f(U) dU \approx f(U_i) \Delta U \quad (2.13)$$

Στη σχέση αυτή υποτίθεται ότι το U_i είναι το μέσο του διαστήματος i , το οποίο έχει εύρος ΔU . Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο το πλήθος των διαστημάτων και έτσι τόσο μικρότερο το πλάτος τους, τόσο πιο ακριβής είναι η προσέγγιση της διακριτής κατανομής. Συνήθως το εύρος των διαστημάτων λαμβάνεται ίσο με 1 m/s, ενώ το πλήθος τους είναι τέτοιο που να καλύπτεται η περιοχή ταχυτήτων στις οποίες λειτουργούν οι Α/Γ (συνήθως από 0 m/s έως 25 ή 30m/s).

Η διακριτή κατανομή F_i υπολογίζεται άμεσα από τις μετρήσεις

$$F_i = \frac{n_i}{N} \quad (2.14)$$

Όπου n_i είναι το πλήθος των μετρήσεων που ανήκουν στο διάστημα i και N ο συνολικός αριθμός μετρήσεων.

Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου (συνήθως μέση ετήσια), προσδιορίζεται από τη διακριτή κατανομή ως εξής:

$$\bar{U} = \sum_i^N F_i U_i \quad (2.15)$$

ή αν οι τιμές του F_i δίνονται σε ώρες/έτος, από :

$$\bar{U} = \frac{1}{8760} \sum_i^N F_i U_i \quad (2.16)$$

όπου N ο συνολικός αριθμός διαστημάτων της ταχύτητας του ανέμου.

Εκτίμηση Ενεργειακής Απόδοσης Αιολικού Δυναμικού

Η Ισχύς P_a μιας ποσότητας ανέμου η οποία κινείται με ταχύτητα U , είναι ίση με την ανά μονάδα χρόνου κινητική ενέργεια που περιέχεται στην ποσότητα αυτή, δηλαδή:

$$P_a = \frac{1}{2} m_w U^2 \quad (2.17)$$

όπου m_w είναι η μάζα του αέρα η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$m_W = \rho A U \quad (2.18)$$

Όπου $\rho = 1,2 \div 1,3 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ η πυκνότητα του αέρα, $A [m^2]$ η επιφάνεια της κινούμενης μάζας αέρα και $U \left[\frac{m}{sec} \right]$ η ταχύτητα του αέρα.

Έτσι από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει η γνωστή εξίσωση της ισχύος κινούμενης μάζας αέρα:

$$P_\alpha = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.19)$$

Από την εξίσωση της ισχύος κινούμενης μάζας αέρα και με δεδομένη την κατανομή ταχυτήτων σε ένα ευρύ πεδίο τιμών προκύπτει η **Μέση Αεροδυναμική Ισχύς** που δίνεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$\overline{P_\alpha} = \int_0^\infty P_\alpha(U) f(U) dU = \frac{1}{2} \rho A \int_0^\infty U^3 f(U) dU = \frac{1}{2} \rho A \overline{U^3} \quad (2.20)$$

Ένα μέρος από την ισχύ αυτή μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ όταν η μάζα του αέρα προσκρούσει σε κάποιο μέσο (π.χ στις έλικες μιας Α/Γ). Το ποσό αυτό είναι :

$$P_m = C_p P_\alpha \quad (2.21)$$

όπου:

C_p είναι ο **Αεροδυναμικός Συντελεστής** μετατροπής της ισχύος του ανέμου.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής δηλώνει το ποσοστό της ισχύος του ανέμου που μετατρέπεται σε άλλη μορφή ισχύος, συνήθως μηχανική. Στις ανεμογεννήτριες ο αεροδυναμικός συντελεστής εξαρτάται έντονα από το **λόγο των ακροπτερυγίων** τους και την ελεγχόμενη γωνία κλίσης (pitch) των πτερυγίων β.

Ο λόγος των ακροπτερυγίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{\omega_R R}{U} \quad (2.22)$$

όπου $\omega_R \left[\frac{rad}{sec} \right]$ η κυκλική ταχύτητα του πτερυγίου, $R [m]$ το μήκος του πτερυγίου και

$U \left[\frac{m}{sec} \right]$ η ταχύτητα του αέρα

Τελικά ο αεροδυναμικός συντελεστής, με βάση τα παραπάνω είναι:

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_m}{P_a} \quad (2.23)$$

Από τις σχέσεις
$$\begin{cases} P_a = \frac{1}{2} \rho A U^3 \\ P_m = C_p P_a \end{cases} \quad \text{προκύπτει ότι}$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) A U^3 \quad (2.24)$$

Η επιφάνεια A για μια A/Γ είναι η επιφάνεια κυκλικού δίσκου που διαγράφουν τα πτερύγια της, έχει μονάδα μέτρησης το m^2 και υπολογίζεται από τον τύπο $A = \pi R^2$.

Γενικά η παραγόμενη ενέργεια σε χρονικό διάστημα T είναι:

$$E = \int_0^T P(t) dt = T \left(\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \right) = T \bar{P} \quad (2.25)$$

Στη σχέση αυτή $P(t)$ είναι η **στιγμιαία ισχύς** και \bar{P} η **μέση ισχύς** εξόδου της A/Γ .

Εξ' ορισμού η μέση ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{P} = \int_0^\infty f(U) P(U) dU \quad (2.26)$$

Όπου $P(U)$ είναι η αναλυτική έκφραση της καμπύλης ισχύος της A/Γ σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης

$$\bar{E} = T \int_0^\infty h(v) P(v) dv \quad (2.27)$$

Συνήθως το διάστημα T είναι ίσο με 8760 ώρες (οι ώρες ενός έτους κατά προσέγγιση).

Εναλλακτικά αντί της συνεχούς κατανομής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διακριτή κατανομή:

$$E = 8760 \sum_{i=1}^N H_i P_i \quad (2.28)$$

Οι μονάδες ενέργειας σε kWh ή MWh ενώ $P_i = P(V_i)$ είναι η ισχύς εξόδου που αντιστοιχεί (μέσω της καμπύλης ισχύος της A/Γ) στο διάστημα I, με κέντρο V_i . Δηλαδή για κάθε διάστημα, η ενεργειακή του συνεισφορά είναι:

$$E_i = 8760 H_i P_i. \quad (2.29)$$

Στην περίπτωση που η διακριτή κατανομή H_i εκφράζεται σε ώρες/έτος, η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$E = \sum_i^N H_i P_i \quad (2.30)$$

Κατανομή Rayleigh

Η κατανομή Rayleigh, όπως είπαμε αποτελεί ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull για συντελεστή $k=2$. Από τις μετρήσεις γενικά που έχουν γίνει στις ταχύτητες ανέμων, έχει διαπιστωθεί ότι αυτές περιγράφονται σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό, από το συγκεκριμένο τύπο κατανομής.

Συνοψίζοντας λοιπόν την παραπάνω ανάλυση, ειδικά για την κατανομή Rayleigh, έχουμε:

Η συνάρτηση πιθανότητας της ταχύτητας (2.4) παίρνει τη μορφή:

$$f(U) = \frac{2}{c^2} e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^2} \quad (2.31)$$

αποδεικνύεται επίσης ότι :

$$\bar{U} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \quad (2.32)$$

(η ποσότητα αυτή είναι προσεγγιστικά $\bar{U} \approx 0.90c$)

Οπότε η συνάρτηση πιθανότητας της ταχύτητας σε σχέση με τη μέση ταχύτητα γίνεται:

$$f(U) = \frac{\pi}{2} \frac{U}{\bar{U}^2} e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2} \quad (2.33)$$

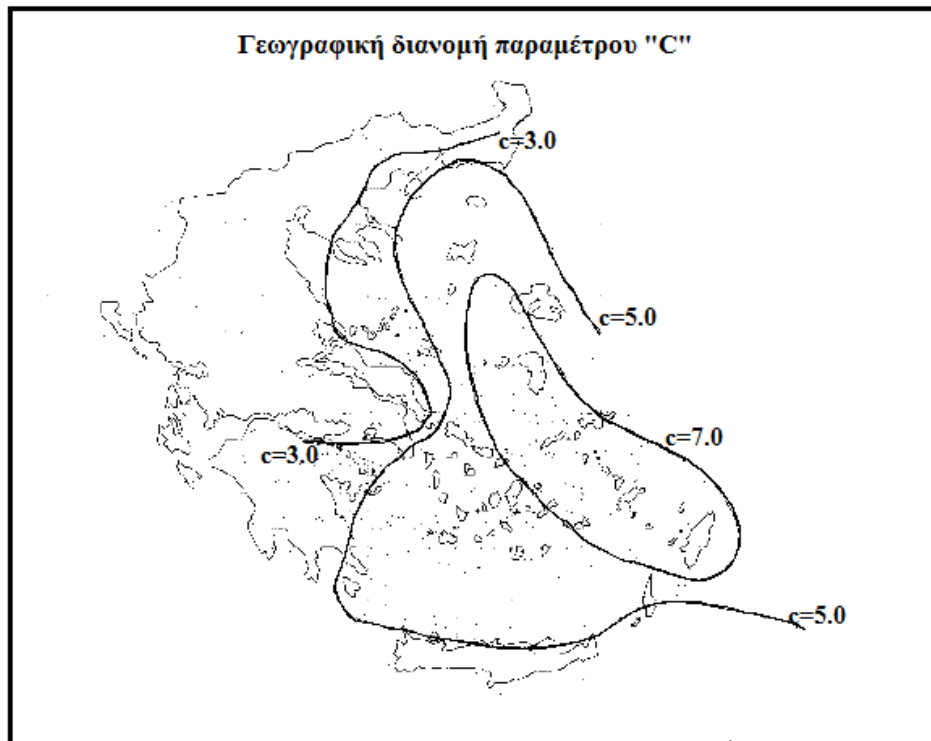
Επιπλέον για τη **Μέση Κυβική Ταχύτητα** του ανέμου αποδεικνύεται ότι

$$\overline{U^3} = \frac{3c^3\sqrt{\pi}}{4} \quad (2.34)$$

και

$$\overline{U^3} = \frac{6\overline{U^3}}{\pi} \quad (2.35)$$

Στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στην περιοχή του Αιγαίου οι τιμές της παραμέτρου c κυμαίνονται μεταξύ του 5.0 και του 7.0 και οι τιμές της k μεταξύ του 1.3 και 2.0.



Εικόνα 2.5: Γεωγραφική διανομή παραμέτρου C

Ο όρος «χωρίς περιορισμούς» αναφέρεται στην περίπτωση όπου η Α/Γ συνδέεται σε ΣΗΕ το οποίο είναι πάντοτε σε θέση να απορροφήσει όλη την ισχύ που αυτή παράγει (χωρίς περιορισμούς). Η περίπτωση αυτή αφορά συνήθως τη σύνδεση Α/Γ στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα, υπό την προϋπόθεση χαμηλής διείσδυσης αιολικής ενέργειας. Στην πράξη πολλά Α/Π συνδέονται σε μη Διασυνδεδεμένα Συστήματα όπως αυτά των νησιών, όπου η λειτουργία συμβατικών μονάδων παραγωγής εισάγει περιορισμούς στη λειτουργία των Α/Γ (τέτοιοι περιορισμοί σχετίζονται με τα τεχνικά ελάχιστα των συμβατικών σταθμών και τη δυναμική τους συμπεριφορά).

Στην περίπτωση λοιπόν που δεν υφίστανται περιορισμοί, η εκτίμηση της (συνήθως ετήσιας) ενεργειακής παραγωγής των Α/Γ, γίνεται λαμβάνοντας υπόψη :

α. Την καμπύλη ισχύος της Α/Γ και

β. Τη στατιστική κατανομή του ανέμου στη θέση εγκατάστασης.

Το αποτέλεσμα είναι ότι η αιολική ενέργεια δεν παρέχει μια σταθερή έξοδο επειδή η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή. Έτσι η ετήσια παραγωγή ενέργειας που παράγει μια ανεμογεννήτρια δεν είναι ποτέ ίση με το γινόμενο της ονομαστικής της ισχύος επί τις ώρες του έτους. Ο λόγος της πραγματικής παραγωγής σε ένα έτος προς το θεωρητικό μέγιστο ονομάζεται συντελεστής δυναμικού. Παρόλο όμως που η ενέργεια που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια σε μικρό χρονικό διάστημα (ώρες ή μέρες) δεν είναι προβλέψιμη, η ετήσια παραγωγή παρουσιάζει διακύμανση μόνο μερικών ποσοστιαίων μονάδων.

Γενικότερα η πρόβλεψη περιλαμβάνει 2 στάδια: το μετεωρολογικό το οποίο έχει σκοπό να προβλέψει τον άνεμο στο συγκεκριμένο σημείο για τις επόμενες μέρες και ώρες και το στάδιο μετατροπής ενέργειας το οποίο περιλαμβάνει την μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε ενέργεια. Συνήθως το πρώτο στάδιο στηρίζεται στη βελτίωση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού οι οποίες παρέχονται για το χώρο γύρω από το αιολικό πάρκο και σε διαφορετικά ύψη. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται στατιστικός υποβιβασμός. Το δεύτερο στάδιο στην ουσία μοντελοποιεί την καμπύλη ισχύος του αιολικού πάρκου, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τα φαινόμενα σκίασης και τις διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους (θερμοκρασία, πυκνότητα αέρα κλπ). Φυσικά κάθε από τα παραπάνω στάδια στη διαδικασία πρόγνωσης εισάγει ένα σφάλμα το οποίο επηρεάζει την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Με μια πρώτη ματιά ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι ο μετεωρολογικός γιατί όσο καλύτερα εκτιμούμε τον άνεμο τόσο καλύτερα εκτιμούμε την αιολική παραγωγή. Τα σφάλματα ωστόσο είναι ιδιαίτερα μεταβλητά. Αυτά μπορεί στη συνέχεια να μεγεθυνθούν ή να μειωθούν με τη διαδικασία μετατροπής του ανέμου σε ισχύ. Συμπερασματικά καταλήγουμε ότι η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής είναι ένα πολύπλοκο θέμα και ότι σκοπός πρέπει να είναι η συνεργασία μοντέλων διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Ενδεικτικά κάποια μοντέλα πρόβλεψης που έχουν αναπτυχθεί είναι τα στατιστικά (wind power prediction tool, spreolico, advanced wind power prediction tool, armines wind power prediction system, localpred, zephyr, arx-models), και τα νευρωνικά, φυσικά (Persistence, predictor, ewind, previento, hirpom)

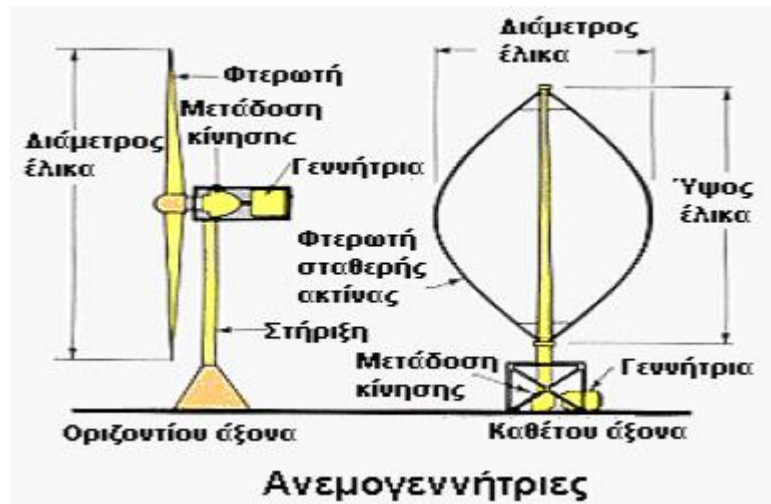
2.1.2 Κατασκευαστική δομή και τύποι ανεμογεννητριών



Εικόνα 2.6: Ανεμογεννήτριες αιολικού πάρκου

Μέχρι σήμερα έχουν επινοηθεί και λειτουργήσει από αρχαιοτάτων χρόνων περισσότεροι τύποι ανεμομηχανών από οποιοδήποτε άλλο τύπο εφεύρεσης. Υπάρχουν δύο κατηγορίες ανεμογεννητριών ανάλογα με τον άξονα περιστροφής του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας ως προς το πεδίο ροής του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες επομένως είναι κατακόρυφου ή οριζόντιου άξονα.

- **Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (head on)**, στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους.
- **Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (cross wind)** στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της Γης αλλά κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου.
- **Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα**, στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και στη ροή του ανέμου.



Εικόνα 2.7: Α/Γ οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα

Σύγκριση ανεμογεννητριών οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν το πλεονέκτημα ότι η γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων και άλλα τμήματα τους τοποθετούνται στο έδαφος και έτσι δεν απαιτείται πύργος. Εκτός αυτού δεν απαιτείται και σύστημα προσανατολισμού του δρομέα προς τη διεύθυνση του ανέμου για να είναι αποτελεσματικές, γεγονός σημαντικό ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η κατεύθυνση του ανέμου παρουσιάζει υψηλή μεταβλητότητα. Γενικότερα η δομή των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι απλούστερη κατασκευαστικά. Ωστόσο οι ανεμογεννήτριες αυτές έχουν το μειονέκτημα ότι το κάτω μέρος του δρομέα βρίσκεται πολύ κοντά στο έδαφος, όπου επικρατούν χαμηλές ταχύτητες ανέμου και έτσι έχουν μέτρια συνολική απόδοση, ενώ η αεροδυναμική τους ισχύς ταλαντώνεται έντονα λόγω της συνεχούς αλλαγής του βήματος των πτερυγίων. Εκτός αυτού ο δρομέας δεν αναπτύσσει ροπή εκκίνησης αλλά πρέπει αρχικά να λειτουργήσει σαν κινητήρας, παίρνοντας ρεύμα από το δίκτυο. Τέλος απαιτείται σχετικά μεγάλη επιφάνεια λόγω των καλωδίων στήριξης και αντιμετωπίζονται δυσκολίες μηχανικής συντήρησης.

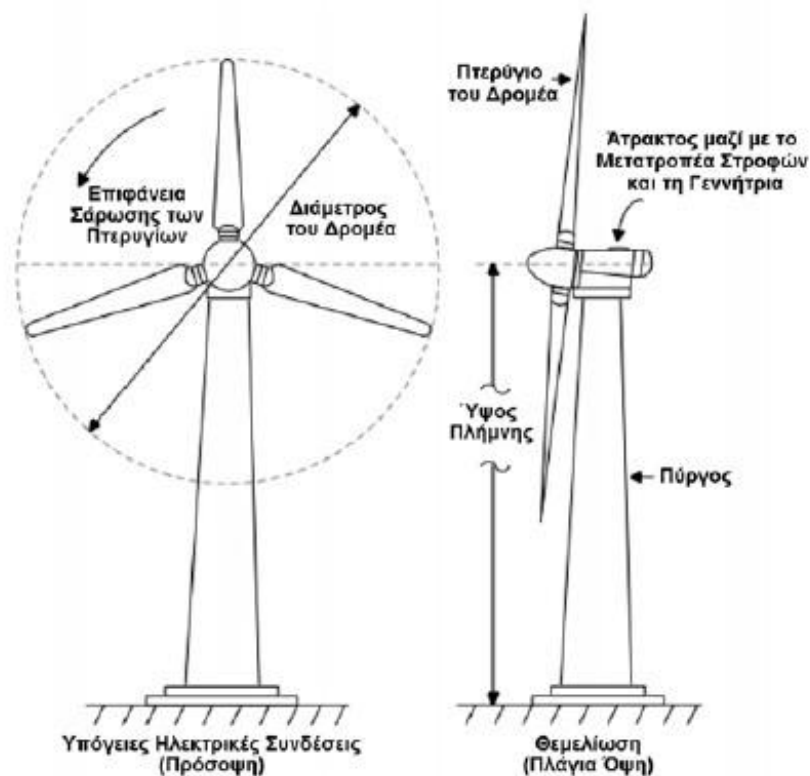


Εικόνα 2.8: Α/Γ κατακόρυφου άξονα



Εικόνα 2.9: Α/Γ οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα και γι' αυτό έχουν επικρατήσει περισσότερο στην αγορά. Καταρχάς έχουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή, καθώς η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετούνται στην κορυφή γιατί η ταχύτητα του ανέμου είναι ανάλογη του υψομέτρου. Έτσι η απόδοση των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι μεγαλύτερη από αυτές του κατακόρυφου άξονα που τοποθετούνται πιο κοντά στο έδαφος. Βέβαια ο σχεδιασμός αυτός των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι πιο σύνθετος και ακριβός. Άλλο μειονέκτημα τους είναι η ανάγκη ύπαρξης μηχανισμού περιστροφής, για τον προσανατολισμό της έλικας προς τον άνεμο.



Εικόνα 2.10 : Δομή Ανεμογεννήτριας

Δομή και Λειτουργία: Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια μια ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής ο οποίος κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Αν η ένταση του ανέμου ενισχυθεί πάρα πολύ, η τουρμπίνα έχει ένα φρένο που περιορίζει την υπερβολική αύξηση περιστροφής των πτερυγίων για να περιοριστεί η φθορά της και να αποφευχθεί η καταστροφή της. Η ταχύτητα του ανέμου πρέπει να είναι περισσότερο από 15 χιλιόμετρα την ώρα για να μπορέσει μια κοινή τουρμπίνα να παράγει ηλεκτρισμό. Συνήθως παράγουν 50–300 kw η κάθε μία. Καθώς η γεννήτρια περιστρέφεται παράγει ηλεκτρισμό με τάση 25000 volt. Το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει πρώτα από ένα μετασχηματιστή στην ηλεκτροπαραγωγική μονάδα ο οποίος ανεβάζει την τάση του στα 400000 volt.



Εικόνα 2.11: Μηχανικά χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας

Τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που απεικονίζεται στο σχήμα είναι τα ακόλουθα:

- **Δρομέας:** Ο δρομέας αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα τα οποία προσδένονται πάνω στην πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.
- **Κουβούκλιο:** Το κουβούκλιο περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας συμπεριλαμβανομένου του κιβωτίου ταχυτήτων και της ηλεκτρικής γεννήτριας. Πρόσβαση στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας επιτρέπεται μέσω του πύργου. Αριστερά από το κουβούκλιο φαίνονται τα κινούμενα μέρη της ανεμογεννήτριας που είναι τα πτερύγια και η κεφαλή.
- **Πτερύγια:** Τα πτερύγια ‘συλλαμβάνουν’ τον αέρα και μεταφέρουν την ισχύ του στην κεφαλή του δρομέα. Σε μία μοντέρνα ανεμογεννήτρια 1000kW κάθε πτερύγιο έχει μήκος 27m και είναι σχεδιασμένο περίπου όπως ένα φτερό αεροπλάνου. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μία πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.
- **Κεφαλή:** Η κεφαλή του δρομέα είναι συνδεδεμένη με το διαφορικό χαμηλής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 2.12: Κεφαλή ανεμογεννήτριας

- **Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων:** Το διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων συνδέει την κεφαλή του δρομέα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Σε ανεμογεννήτρια 1000 kW ο δρομέας περιστρέφεται σχετικά αργά, περίπου 19 με 30 περιστροφές ανά λεπτό (rpm). Το διαφορικό περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο.
- **Κιβώτιο ταχυτήτων:** Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει από αριστερά το διαφορικό χαμηλών στροφών και μεταφέρει την κίνηση δεξιά στο διαφορικό υψηλών στροφών κάνοντας το να περιστρέφεται με ταχύτητα 50 φορές μεγαλύτερη από αυτή του διαφορικού χαμηλών στροφών.
- **Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων:** Το διαφορικό υψηλών ταχυτήτων περιστρέφεται περίπου με 1500 στροφές ανά λεπτό (rpm) και οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια. Το διαφορικό είναι εξοπλισμένο με ένα δισκόφρενο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή σε περίπτωση που η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται.
- **Ηλεκτρική γεννήτρια:** Η ηλεκτρική γεννήτρια είναι μια σύγχρονη ή μια ασύγχρονη γεννήτρια. Στις τελευταίες ανεμογεννήτριες η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι μεταξύ 600 και 3000 kW.
- **Μηχανισμός περιστροφής:** Ο μηχανισμός περιστροφής χρησιμοποιεί ηλεκτρικές μηχανές (κινητήρας περιστροφής) για να στρέφει το κουβούκλιο απέναντι στον άνεμο.
- **Ηλεκτρονικός ελεγκτής:** Περιέχει ένα υπολογιστή που παρακολουθεί διαρκώς την κατάσταση της ανεμογεννήτριας και ελέγχει τον μηχανισμό περιστροφής.
- **Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης:** Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιούνται για να μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα

ηλεκτρικά σήματα του ανεμόμετρου χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να αρχίσει την λειτουργία της όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή και για να σταματήσει όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ένα ανώτατο όριο προκειμένου να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια και το περιβάλλον της.

- **Πύργος:** Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει το κουβούκλιο και τα κινούμενα μέρη της. Είναι σημαντικό ο πύργος να είναι ψηλός καθώς οι ταχύτητες του ανέμου αυξάνονται όσο απομακρύνετια από το έδαφος. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες 1000 kW έχουν από ένα πύργο μεταξύ 50 και 80 μέτρων. Ένα πύργος μπορεί να είναι χαλύβδινος ή δικτυωτός.

Οι **χαλύβδινοι πύργοι** είναι κωνικοί, δηλαδή η διάμετρος τους αυξάνει προς τη βάση, ώστε να είναι ευσταθείς και συγχρόνως να μειωθεί το χρησιμοποιούμενο υλικό.

Οι **δικτυωτοί πύργοι** κατασκευάζονται με χαλύβδινα δικτυώματα, και έχουν μειωμένο κόστος αφού απαιτεί το μισό υλικό σε σχέση με τους χαλύβδινους, αλλά για αισθητικούς λόγους έχουν εκλείψει.



Εικόνα 2.13: Χαλύβδινοι πύργοι **Εικόνα 2.14:** Δικτυωτός πύργος

- **Μονάδα ψύξης:** Η μονάδα ψύξης περιέχει ένα ηλεκτρικό ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται για να ψύχει την ηλεκτρική γεννήτρια. Επίσης περιέχει μια μονάδα ψύξης με λάδι η οποία χρησιμοποιείται για να ψύχει το λάδι στο κιβώτιο ταχυτήτων.
- **Υδραυλικό σύστημα:** Το υδραυλικό σύστημα χρησιμοποιείται για να επαναφέρει τα αεροδυναμικά φρένα της ανεμογεννήτριας.

Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται και ως προς τη γωνιακή τους ταχύτητα.

Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι είτε σταθερών είτε μεταβλητών στροφών.

- **Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών (Fix Speed)**

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών συνδέονται απευθείας με το δίκτυο και έχουν πρακτικά σταθερή ταχύτητα περιστροφής ανεξαρτήτως ταχύτητας ανέμου. Οι πρώτες ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σταθερών στροφών και μέχρι σήμερα αποτελούν μεγάλο ποσοστό των συνολικών εγκατεστημένων γεννητριών. Συνδυάζονται είτε με σύγχρονες γεννήτριες είτε με γεννήτριες επαγωγής. Η μεγάλη εξάπλωση τους οφείλεται στο χαμηλό κόστος τους, αφού συνδέονται απευθείας με το δίκτυο και δεν απαιτούνται ούτε παρεμβάλλονται ηλεκτρονικοί μετατροπείς και αντιστροφείς, των οποίων το κόστος είναι υψηλό. Η απευθείας σύνδεση με το δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα του δρομέα να είναι σταθερή και πρακτικά ίση με τη σύγχρονη.

$$N_s = \frac{120f_s}{p} = \text{σταθερή} \quad (2.35)$$

Όπου:

- N_s είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (rpm)
- f_s είναι η συχνότητα στο στάτη που ισούται με τη συχνότητα του δικτύου ($f_s = 50\text{Hz}$)
- p είναι ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας (πάντα ζυγός)

Τα πλεονεκτήματα που έχουν οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών είναι:

- Μικρό κόστος αφού για τη σύνδεση τους με το δίκτυο δεν απαιτούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς των οποίων το κόστος είναι σημαντικό.
- Απλή κατασκευή και σχετικά μικρό βάρος.
- Εξαιρετική αξιοπιστία και περιορισμένη ανάγκη συντήρησης.

Τα σοβαρότερα μειονεκτήματα τους είναι:

- Λόγω της αδυναμίας τους να λειτουργούν με το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή $C_p \max$ και επειδή η ταχύτητα τους είναι σχεδόν σταθερή σε σχέση με την ταχύτητα του δικτύου, δεν μπορούν να αποθηκεύσουν τις ριπές του ανέμου υπό

μορφή μηχανικής ενέργειας, με αποτέλεσμα αυτές να προκαλούν διακυμάνσεις στην ισχύ, επηρεάζοντας την ποιότητα ισχύος του δικτύου.

- Χρησιμοποιούν ασύγχρονη γεννήτρια η οποία απαιτεί την απορρόφηση άεργης ισχύος καθώς δεν μπορεί να ρυθμίσει το συντελεστή ισχύος, ο οποίος είναι χαμηλός.
- Κατά την εκκίνηση και τη ζεύξη – απόζευξη των γεννητριών σταθερών στροφών παρατηρούνται έντονα μεταβατικά φαινόμενα.
- Έχουν αδυναμία παροχής βοηθητικών υπηρεσιών προς το σύστημα.

Εξαιτίας αυτών των αδυναμιών, οι κατασκευαστικές εταιρίες ξεκίνησαν την παραγωγή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, οι οποίες δίνουν λύση σε μεγάλο βαθμό στα παραπάνω προβλήματα.

Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών (Variable speed)

Τα τελευταία χρόνια ο κυρίαρχος τύπος ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται είναι αυτές των μεταβλητών στροφών. Οι ανεμογεννήτριες αυτές συνδέονται με το δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος και λειτουργούν με αυτόματα μεταβαλλόμενη ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων. Το ενδιαφέρον στράφηκε σε αυτές τις ανεμογεννήτριες λόγω της παρουσίας του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος ο οποίος επιτρέπει την ικανοποίηση των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων των διαχειριστών του δικτύου. Φυσικά οι Α/Γ μεταβλητών στροφών έχουν πιο πολύπλοκο ηλεκτρικό σύστημα από τις Α/Γ σταθερών στροφών. Για την ορθή λειτουργία τους απαιτείται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα να είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων. Για την πραγματοποίηση αυτής της αναλογίας (στροφές δρομέα – ταχύτητα ανέμου) χρησιμοποιούνται συστήματα ηλεκτρονικών αντιστροφών (inverters) που ελέγχουν τις στροφές του δρομέα, αποδεσμεύοντας έτσι την Α/Γ από τη συχνότητα του δικτύου και επιτρέποντας της να κυμαίνεται σε μεγάλα διαστήματα συχνοτήτων με αποτέλεσμα τη βέλτιστη λειτουργία. Αυτό συμβαίνει γιατί με τον τρόπο αυτό μπορεί σε κάθε περίπτωση να λειτουργεί με το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή $C_{p,max}$ το οποίο επιτυγχάνεται μέσω του λόγου ταχυτήτων ακροπτερυγίου λ .

Επιπλέον ο inverter επιτυγχάνει την ομαλή σύνδεση στο δίκτυο με την προσαρμογή της ισχύος εξόδου στην ονομαστική συχνότητα του δικτύου.

$$N_s = \frac{120f_s}{p} = \text{μεταβαλλόμενη} \quad (2.36)$$

Όπου η διαφορά της από την αντίστοιχη σχέση των Α/Γ σταθερών στροφών είναι ότι η f_s (συχνότητα στο στάτη) μεταβάλλεται και ελέγχεται από τον αντιστροφέα, ο οποίος μεταβάλλει τις στροφές της Α/Γ σύμφωνα με τη σχέση:

$$N_s = \frac{60U_w \lambda}{2\pi R} \quad (2.37)$$

Όπου

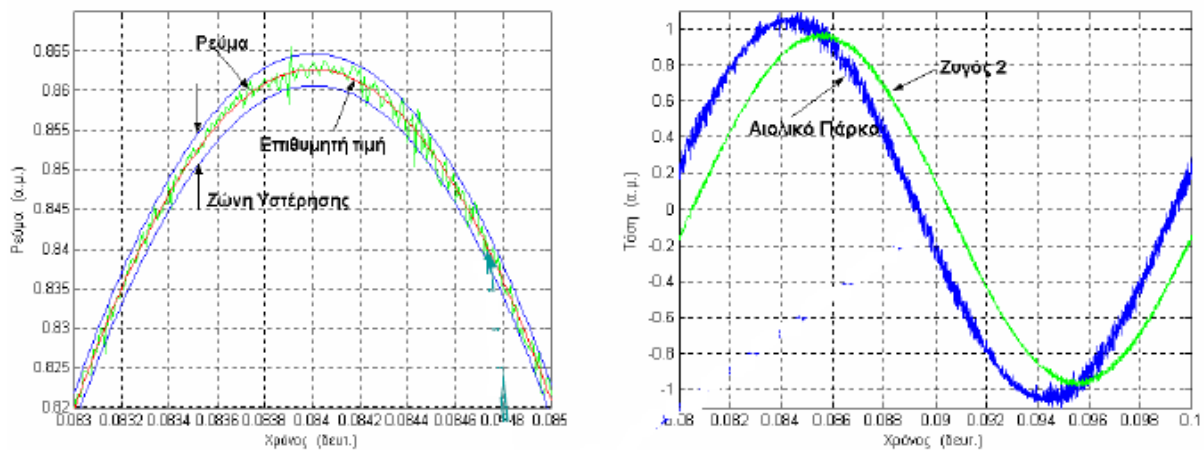
- U_w , η ταχύτητα του ανέμου
- λ , ο λόγος ταχυτήτων ακροπτερυγίου (tip speed ratio)
- R , η ακτίνα των πτερυγίων

Η χρήση τους γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη και προτιμούνται πλέον από των σταθερών στροφών, καθώς έχουν πολλά πλεονεκτήματα τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι:

- Αύξηση ενεργειακής απόδοσης
- Μείωση των μηχανικών καταπονήσεων (πτερύγια, σύστημα μετάδοσης της κίνησης και δομικό σύστημα) που συνεπάγεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- Δυνατότητα απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων
- Μείωση του ακουστικού θορύβου καθώς είναι δυνατή η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, σε περίπτωση ασθενούς ανέμου.
- Προσαρμογή της Α/Γ στις τοπικές συνθήκες ανέμου
- Καλύτερη ποιότητα ισχύος (Μείωση διακυμάνσεων ισχύος εξόδου)
- Δυνατότητα ελέγχου άεργου ισχύος
- Δυνατότητα ρύθμισης τάσης (σε ασθενή δίκτυα) και της συχνότητας (σε αυτόνομα)
- Διευκόλυνση διαδικασιών εκκίνησης

Τα κυριότερα μειονεκτήματα τους αφορούν τον οικονομικό τομέα αφού απαιτούν σύνδεση ηλεκτρονικών ισχύος. Εκτός αυτού εμφανίζουν αδυναμίες που αφορούν στην αυξημένη πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών μετατροπέων, στην έγχυση αρμονικών στο δίκτυο και στην αύξηση των απωλειών λόγω της παραμόρφωσης των ρευμάτων της γεννήτριας. Με την πάροδο όμως της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος, πολλά από τα παραπάνω προβλήματα αναμένεται να επιλυθούν.

Τα αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν έναν υψίσυχο θόρυβο στις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος που οφείλεται στην ύπαρξη ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος.



Εικόνα 2.15: Διαγράμματα ρεύματος και τάσης Α/Γ μεταβλητών στροφών

Τέλος οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται ως προς τον τύπο των πτερυγίων τους.

Ένα λοιπόν ακόμα κριτήριο διαχωρισμού των Α/Γ είναι ο τύπος των πτερυγίων τους και ο τρόπος ελέγχου της γωνίας τους, προκειμένου να περιορίζεται η παραγόμενη αεροδυναμική ισχύς.

Ανεμογεννήτριες με έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (Pitch Control)

Οι ανεμογεννήτριες αυτές έχουν πτερύγια που μπορούν να περιστραφούν κατά το διαμήκη άξονά τους. Με τη μεταβολή του βήματος της έλικας, δηλαδή της γωνίας β που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με την κατεύθυνση της κίνησης (pitch angle), ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια η ασκούμενη ροπή. Η γωνία β παίρνει τιμές από 0° έως 90° . Πιο συγκεκριμένα, για έλεγχο ισχύος, παίρνει τιμές 0° έως 35° περίπου. Όταν η Α/Γ λειτουργεί με άνεμο πάνω από τον ονομαστικό, τα πτερύγια στρέφονται κατά κατάλληλη γωνία μέσα από ένα σύστημα ελέγχου και έτσι εξασφαλίζεται ότι δεν θα αναπτυχθεί ροπή μεγαλύτερη της ονομαστικής. Βέβαια για να σταματήσει η περιστροφή της Α/Γ (αεροδυναμική πέδηση) όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της έλικας σε μηχανική καταπόνηση, τα πτερύγια στρέφονται στις 90° ώστε να παρουσιάζουν την ελάχιστη αντίσταση.

Λειτουργώντας λοιπόν με αυτή τη μέθοδο (pitch control) αναπτύσσονται χαμηλότερα φορτία στα πτερύγια και στο δομικό σύστημα της Α/Γ, περιορίζεται η αεροδυναμική ισχύς

χωρίς όμως να διακοπεί η λειτουργία ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση σε χαμηλό άνεμο.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η μεγάλη πολυπλοκότητα λόγω του ελέγχου τους καθώς και η καταπόνηση των πτερυγίων λόγω αδρανειακής φόρτισης.

Ανεμογεννήτριες με παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο (Passive stall control)

Οι ανεμογεννήτριες αυτές λειτουργούν με αεροδυναμικό έλεγχο της ροής και της ισχύος του δρομέα (passive stall control) χωρίς όμως να πραγματοποιείται έλεγχος του βήματος. Διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης τα οποία όμως σε υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Η ανυψωτική δύναμη σταματάει να αυξάνεται και έτσι περιορίζεται η αναπτυσσόμενη ροπή και η παραγόμενη ενέργεια και αποφεύγεται η φόρτιση της Α/Γ πέρα από τα όρια για τα οποία έχει σχεδιαστεί.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η απλότητα κατασκευής, το χαμηλό κόστος και η απουσία ανάγκης συντήρησης, αποφεύγοντας κινούμενα τμήματα στο δρομέα και πολύπλοκα συστήματα ελέγχου.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα αυτού του τρόπου ελέγχου είναι τα υψηλά φορτία που αναπτύσσονται στο δρομέα και στο δομικό σύστημα, η αδυναμία ρύθμισης της ισχύος εξόδου και η μειωμένη παραγόμενη ισχύς σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

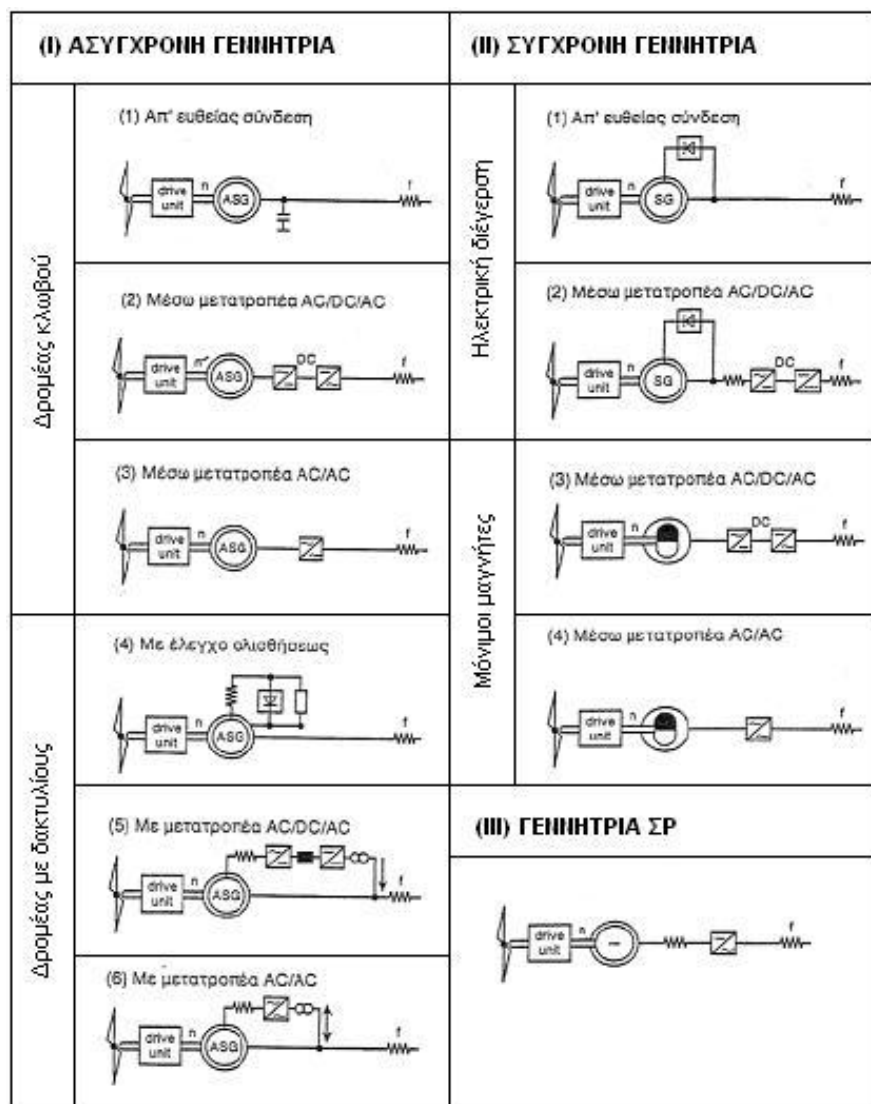
Ανεμογεννήτριες με ενεργό αεροδυναμικό έλεγχο (Active stall control)

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται πολύ, σε ανεμογεννήτριες 1MW και μεγαλύτερες, ενεργός έλεγχος του βήματος των πτερυγίων (active stall). Αυτός ο τρόπος ελέγχου διαφέρει σε σχέση με τον κλασικό έλεγχο του βήματος των πτερυγίων καθώς όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή και η Α/Γ πρόκειται να υπερφορτιστεί, η γωνία (pitch) μεταβάλλεται αντίθετα (negative pitch control) ώστε να γίνει πιο έντονο το φαινόμενο stall (stall effect) και να αποκοπεί με αυτόν τον τρόπο η περίσσεια αεροδυναμική ισχύς. Το εύρος τιμών της γωνίας είναι μικρό 0° έως 4° .

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι η ισχύς εξόδου της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην καταπονείται το σύστημα σε περιόδους ριπών ανέμου. Εκτός αυτού η Α/Γ, με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να αποδίδει σχεδόν την ονομαστική της ισχύ σε όλες τις υψηλές ταχύτητες ανέμου, σε αντίθεση με Α/Γ που χρησιμοποιούν passive stall control. Επίσης εκτός της καλύτερης απόδοσης επιτυγχάνεται και ευκολότερη εκκίνηση και αποσύνδεση.

2.1.3 Δομή του ηλεκτρικού μέρους των ανεμογεννητριών

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται μια σειρά από χαρακτηριστικές διαμορφώσεις συστημάτων μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί ή εξετάζεται η εφαρμογή τους.



Εικόνα 2.16: Τυπικές διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών

(I) Ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη γεννήτρια, με δρομέα κλωβού, (για μικρά σχετικά μεγέθη Α/Γ) ή με τυλιγμένο δρομέα και δακτυλίους (για μέσου ή και μεγάλου μεγέθους Α/Γ).

1) Απ' ευθείας σύνδεση: Είναι το απλούστερο σύστημα μετατροπής, το οποίο χαρακτηρίζεται από το ότι απορροφά την απαιτούμενη άεργο ισχύ από το δίκτυο, πλήρως ή μερικώς αν εγκατασταθούν παράλληλα πυκνωτές. Οι στροφές της Α/Γ παραμένουν

περίπου σταθερές και συγκεκριμένα αυξάνονται ολίγο (π.χ. κατά 1 -3%) με την αύξηση του φορτίου της Α/Γ.

2) Μέσω μετατροπέα Ανορθωτή-Αντιστροφέα: Η παραγόμενη από την Α/Γ τάση και ένταση ΕΡ μετατρέπεται σε ΣΡ (μέσω του Ανορθωτή) και ακολούθως μετατρέπεται (μέσω του Αντιστροφέα) σε τάση /ένταση ΕΡ 50 Hz. Η απαιτούμενη για τη διέγερση της ασύγχρονης γεννήτριας άεργος ισχύς μπορεί να παράγεται από πυκνωτές, εκτός εάν ο ανορθωτής είναι ελεγχόμενος, οπότε και ο έλεγχος είναι καλύτερος. Η ροή ισχύος προς το δίκτυο ελέγχεται, μέσω του μετατροπέα, και κατά συνέπεια και οι στροφές (π.χ. μπορούν μεταβάλλονται από 0.8 – 1.2 φορές τις ονομαστικές).

3) Μέσω κυκλομετατροπέα: Η ροή άεργου ισχύος, για τη διέγερση της γεννήτριας από το δίκτυο είναι δυνατή. Ο έλεγχος (ενεργού) ισχύος και στροφών μπορεί να γίνεται όπως και στο 2.

4) Με έλεγχο της ολισθήσεως (στροφών), δια μεταβολής εσωτερικών αντιστάσεων σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα. Ο έλεγχος των αντιστάσεων γίνεται μέσω κατατμητή (chopper). Η άεργος ισχύς για τη διέγερση λαμβάνεται από το δίκτυο.

Στη διαμόρφωση αυτή, όπως και τις επόμενες 5 και 6, είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση μηχανής με τυλιγμένο δρομέα και δακτυλίου.

5) Με μετατροπέα AC/DC/AC στο δρομέα. Η γεννήτρια λειτουργεί συνήθως σε «υπέρ-σύγχρονες», στροφές (π.χ. 1,1 – 1,5 φορές την ονομαστική), παρέχοντας ενεργό ισχύ προς το δίκτυο από τον στάτη και το δρομέα. Η άεργος ισχύς για τη διέγερση της λαμβάνεται συνήθως από το δίκτυο.

6) Με μετατροπέα AC/AC διπλής κατευθύνσεως στον δρομέα. Η γεννήτρια μπορεί να λειτουργεί με ροή ενεργού ισχύος στον δρομέα από και προς το δίκτυο, να μην απορροφά άεργο ισχύ απ' αυτό και οι στροφές να είναι υπό- ή υπέρ-σύγχρονες (π.χ. 0.8 – 1.2 φορές ως ονομαστικές).

(II) Με Σύγχρονη γεννήτρια. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μέσου και μεγάλου μεγέθους Α/Γ. Μπορούν να διακριθούν σε «ηλεκτρικά διεγειρόμενες», (συνήθως αυτοδιεγειρόμενες μέσω ανορθωτών) και με «μόνιμους μαγνήτες». Πλεονέκτημα των πρώτων είναι η δυνατότητα ελέγχου της διεγέρσεως και συνεπώς της παραγωγής αέργου ισχύος, ενώ οι δεύτερες είναι απλούστερες και στιβαρότερες.

1) Απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο. Λειτουργούν βεβαίως μόνο με τη σύγχρονη ταχύτητα που επιβάλλεται από το δίκτυο, μπορεί όμως να ελέγχεται η ροή αέργου ισχύος.

2) Με μετατροπέα AC/DC/AC. Μπορεί να λειτουργεί με μεταβλητές στροφές (π.χ. 0,5 – 1,2 φορές τις σύγχρονες). Άεργος ισχύς για τον αντιστροφέα μπορεί να λαμβάνεται από το δίκτυο.

3) Με μόνιμους μαγνήτες και μετατροπέα AC/DC/AC. Μπορεί να λειτουργεί υπό μεταβλητές στροφές (π.χ. 0,7 – 1,2 φορές την ονομαστική).

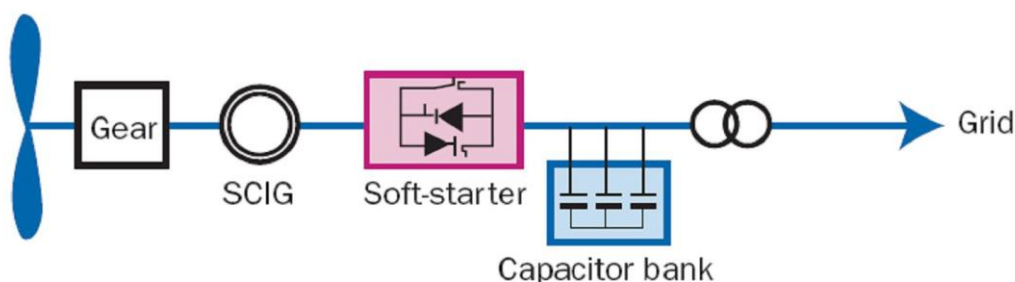
4) Με μόνιμους μαγνήτες και μετατροπέα AC/AC διπλής κατευθύνσεως. Όπως και προηγουμένως αλλά περιορίζεται η απορρόφηση άεργου ισχύος από το δίκτυο.

(III) Με γεννήτρια ΣΡ. Γεννήτριες ΣΡ χρησιμοποιούνται σε μικρή έκταση, κυρίως για μικρού μεγέθους Α/Γ, ιδίως όταν γίνεται απ' ευθείας χρήση ΣΡ. Οπωσδήποτε για την πληρότητα του παραπάνω πίνακα παρουσιάζεται η περίπτωση Α/Γ με γεννήτρια ΣΡ, η οποία συνδέεται στο δίκτυο μέσω αντιστροφέα.

Τα βασικά είδη ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα κατατάσσονται στους τύπους Α έως Δ όπως φαίνεται παρακάτω:

Τύπου Α: Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής

Οι ανεμογεννήτριες τεχνολογίας τύπου Α παρουσιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στις αρχές της δεκαετίας του 80. Πρόκειται για το πιο διαδεδομένο είδος της προηγούμενης γενιάς ανεμογεννητριών, το οποίο συνδυάζει απλότητα και στιβαρότητα με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αν και αποτελούν σημαντικό ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος (περίπου 30% στην Ευρώπη το 2004) σήμερα αποτελούν μικρό ποσοστό των νέων μηχανών που εγκαθίστανται κάθε χρόνο (< 20%) κυρίως λόγω της συμπεριφοράς τους κατά την αντιμετώπιση σφαλμάτων στο δίκτυο καθώς απορροφούν μεγάλες ποσότητες άεργου ισχύος.



Εικόνα 2.17: Διάγραμμα ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής

Gear: Κιβώτιο ταχυτήτων

SCIG: A/Γ

Soft-starter: Σύστημα ομαλής εκκίνησης

Capacitor bank: Πυκνωτές

Grid: Δίκτυο

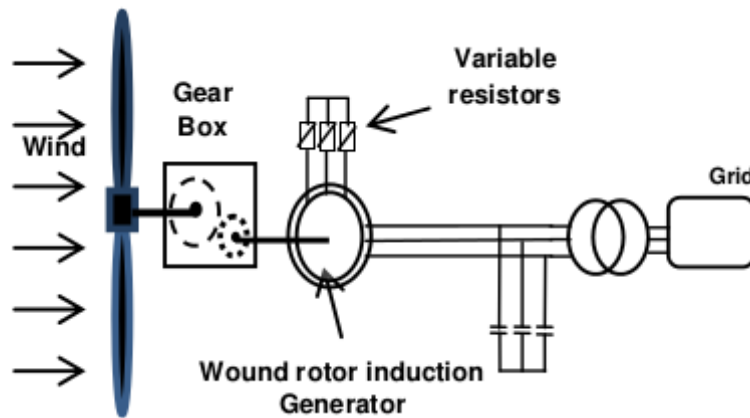
Η έλικα και ο δρομέας της γεννήτριας συνδέονται μέσω μειωτήρα στροφών. Χρησιμοποιείται απλή μηχανή επαγωγής, συνήθως τύπου κλωβού (Squirrel Cage Induction Generator, SCIG), συνδεδεμένη απευθείας στο δίκτυο. Οι ανεμογεννήτριες αυτές θεωρούνται σταθερών στροφών επειδή η ταχύτητα περιστροφής των μηχανών επαγωγής, αν και μεταβάλλεται με το σημείο λειτουργίας, είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα (η ολίσθηση είναι μόλις 1%-2%). Η γεννήτρια επαγωγής μπορεί να είναι μίας ή δύο ταχυτήτων. Η λειτουργία δύο ταχυτήτων δίνει βελτιωμένη απόδοση και χαμηλότερο θόρυβο σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Ο αεροδυναμικός έλεγχος των ανεμογεννητριών αυτών είναι κατά κανόνα τύπου stall, αλλά υπάρχουν και μοντέλα με έλεγχο της γωνίας βήματος (pitch ή active stall).

Για τον περιορισμό των υπερεντάσεων και των συνακόλουθων έντονων μεταβατικών φαινομένων της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της γεννήτριας κατά τη ζεύξη στο δίκτυο, οι μηχανές αυτού του τύπου διαθέτουν πάντοτε διάταξη ομαλής εκκίνησης (soft-starter). Η μηχανή επαγωγής απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο, η οποία είναι αναγκαία για την εγκατάσταση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Τυπικές τιμές του συντελεστή ισχύος υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας είναι περί το 0,9. Για τον λόγο αυτόν είναι πάντοτε απαραίτητη η εγκατάσταση συστοιχίας πυκνωτών αντιστάθμισης στην έξοδο της γεννήτριας, οι οποίοι διορθώνουν τον συντελεστή ισχύος, συνήθως σε τιμές ανώτερες του 0,95.

Τύπου B: Ανεμογεννήτρια εν μέρει μεταβλητών στροφών εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής εξόδου με μεταβλητή αντίσταση δρομέα

Το είδος αυτό είναι παραλλαγή των ανεμογεννητριών τύπου A, έχει ίδια τιμή τυπικού συντελεστή ισχύος υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας και χρησιμοποιήθηκε κυρίως στις δεκαετίες '80 και '90. Χρησιμοποιείται μηχανή επαγωγής τυλιγμένου δρομέα (Wound Rotor Induction Generator, WRIG). Μέσω ηλεκτρονικών ισχύος μεταβάλλεται η ηλεκτρική αντίσταση του δρομέα, επιτρέποντας έτσι τη μεταβολή της ταχύτητας

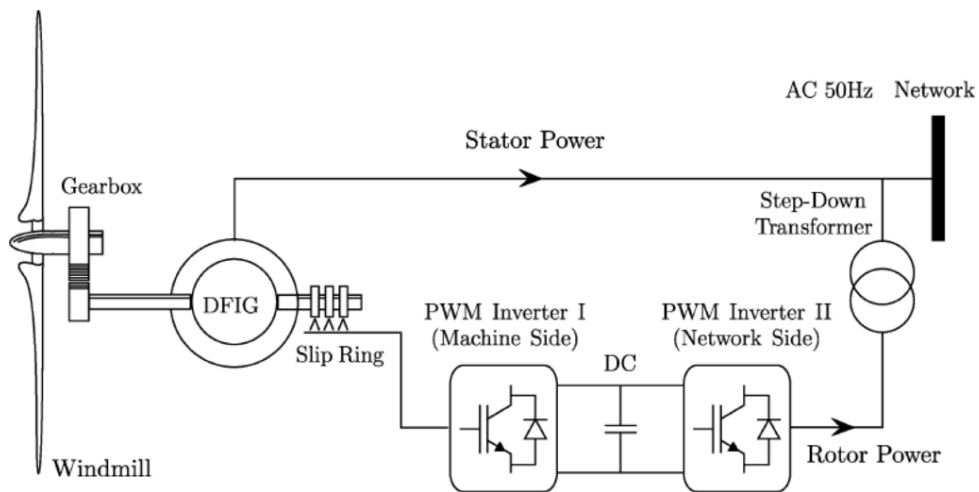
περιστροφής κατά $\pm 10\%$ κατά τη διάρκεια ριπών ανέμου, βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ποιότητα ισχύος και μειώνοντας τη μηχανική φόρτιση των συνιστωσών της μηχανής (με την απώλεια ωστόσο μέρους της μετατρεπόμενης ενέργειας και άρα και της συνολικής απόδοσης). Ο αεροδυναμικός έλεγχος των ανεμογεννητριών αυτών γίνεται με σύστημα μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (pitch control)



Σχήμα 2.18: Διάγραμμα Α/Γ εν μέρει μεταβλητών στροφών εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής εξόδου με μεταβλητή αντίσταση δρομέα

Τύπου Γ: Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης ελεγχόμενη από μετατροπέα

Το είδος αυτό είναι το πιο διαδεδομένο σήμερα. Χρησιμοποιεί ασύγχρονη ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης (Doubly Fed Asynchronous Generator, γνωστή και ως Doubly Fed Induction Generator). Η Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ) είναι μια ασύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα της οποίας τόσο ο στάτης, όσο και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο. Ο στάτης συνδέεται απευθείας, όπως στις κλασικές μηχανές επαγωγής, ενώ ο δρομέας συνδέεται μέσω ψηκτρών και ενός μετατροπέα συχνότητας. Ο μετατροπέας αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWM) οι οποίοι έχουν κοινή DC πλευρά, η τάση των οποίων συντηρείται από πυκνωτή.



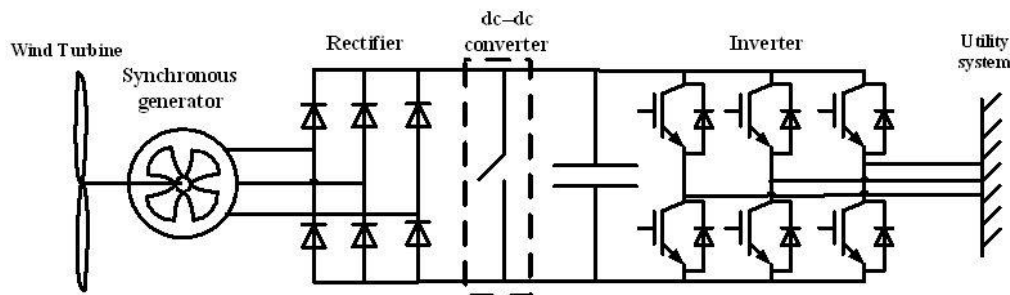
Εικόνα 2.19: Α/Γ μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης ελεγχόμενη από μετατροπέα.

Το κύκλωμα του δρομέα λειτουργεί σε μεταβλητή συχνότητα ρευμάτων μέσω της παροχής ή απορρόφησης ενεργού ισχύος από τον μετατροπέα. Με τον τρόπο αυτό η γεννήτρια μπορεί να μεταβάλλει τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής της έως $\pm 30\%$ σε σχέση με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Ο δρομέας και οι μετατροπείς πηγής τάσης που συνδέονται σε αυτόν διακινούν ποσοστό μόνο της συνολικής ισχύος της μηχανής ενώ η υπόλοιπη ισχύς διακινείται μέσω του κυκλώματος του στάτη. Πρόκειται δηλαδή για ένα μετατροπέα συχνότητας μειωμένης ονομαστικής ισχύος (περίπου 30% της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ), γεγονός που συνεπάγεται σημαντική μείωση του κόστους, αλλά και των απωλειών ενέργειας στους μετατροπείς. Η συνολική ενεργός ισχύς της μηχανής είναι το άθροισμα της ισχύος που διοχετεύεται στο δίκτυο από τον στάτη και (μέσω του μετατροπέα) από τον δρομέα.

Ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής πραγματοποιείται έμμεσα, μέσω του ελέγχου ροπής της γεννήτριας. Σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η ισχύς της γεννήτριας διατηρείται στην ονομαστική της τιμή και ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής γίνεται από το σύστημα μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων (pitch).

Ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση των πυκνωτών της πλευράς DC και συνεπώς η ενεργός ισχύς που αυτός διακινεί ακολουθεί άμεσα την ενεργό ισχύ του δρομέα της γεννήτριας. Ο συντελεστής ισχύος του μετατροπέα εξόδου ρυθμίζεται σε μοναδιαία τιμή υπό κανονικές καταστάσεις λειτουργίας, αλλά η ανεμογεννήτρια έχει τη δυνατότητα να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ. Το χαρακτηριστικό αυτό αξιοποιείται για την παροχή άεργου ρεύματος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Άλλο σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας είναι ότι υπό συνθήκες έχει τη δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία βύθισης της τάσης.

Τύπου Δ: Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών εφοδιασμένη με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετατροπέα συχνότητας



Εικόνα 2.20: Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετατροπέα συχνότητας.

Αυτός ο τύπος Α/Γ περιλαμβάνει γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, ο στάτης της οποίας συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέων ισχύος AC/DC/AC. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η λειτουργία της γεννήτριας υπό ευρέως μεταβαλλόμενη συχνότητα και συνεπώς ταχύτητα περιστροφής. Οι ηλεκτρικές γεννήτριες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι γεννήτριες επαγωγής τύπου κλωβού, αλλά στην συντριπτική πλειοψηφία των εμπορικά διαθέσιμων μηχανών κυριαρχούν οι υλοποιήσεις με σύγχρονες γεννήτριες, είτε με τυλιγμένο δρομέα και ηλεκτρική διέγερση ΣΡ, είτε με διέγερση μόνιμων μαγνητών. Με τη χρήση σύγχρονων γεννητριών με μεγάλο αριθμό πόλων επιτυγχάνονται χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων μικρού λόγου ή ακόμη και την πλήρη απαλοιφή του, με σημαντικά οφέλη κόστους, βάρους, αξιοπιστίας και αναγκών συντήρησης, γεγονός που αποτελεί πολύ βασικό πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης.

Η διακίνηση της ισχύος πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου από το κύκλωμα του στάτη και άρα απαιτούνται μετατροπείς πλήρους ικανότητας (full power converters), ονομαστικής ισχύος ίσης με αυτή της Α/Γ. Ο τύπος αυτός επιτυγχάνει μεγαλύτερο εύρος μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής σε σχέση με τον τύπο Γ, ενώ έχει επίσης ευρύτερες δυνατότητες ελέγχου της άεργου ισχύος εξόδου, ως απόρροια του αυξημένου μεγέθους των μετατροπέων. Από την άλλη πλευρά, η χρήση μετατροπέων πλήρους ισχύος επιβαρύνει το κόστος, ενώ συνεπάγεται και αυξημένες απώλειες.

Το πιο διαδεδομένο σχήμα σήμερα χρησιμοποιεί γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης και

περιλαμβάνει (από τη γεννήτρια προς το δίκτυο με τη σειρά):

- Ανορθωτή διόδων (AC/DC)
- Μετατροπέα DC/DC ανύψωσης τάσης (boost converter) και
- Αντιστροφέα PWM (DC/AC)

Ο αντιστροφέας PWM είναι τύπου πηγής τάσης και ρυθμίζει την ενεργό και την άεργο έγχυση στο δίκτυο, παρέχοντας έτσι ευχέρεια ρύθμισης του συντελεστή ισχύος σε μεγάλο εύρος τιμών. Βέβαια, όπως και στις A/Γ τύπου Γ, ο συντελεστής ισχύος του μετατροπέα εξόδου γενικά ρυθμίζεται σε μοναδιαία τιμή υπό κανονικές καταστάσεις λειτουργίας. Ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης κρατά σταθερή την τάση στην DC πλευρά του μετατροπέα πλευράς δικτύου ενώ ο έλεγχος στροφών πραγματοποιείται μέσω της ρύθμισης της ενεργού έγχυσης του μετατροπέα πλευράς δικτύου.

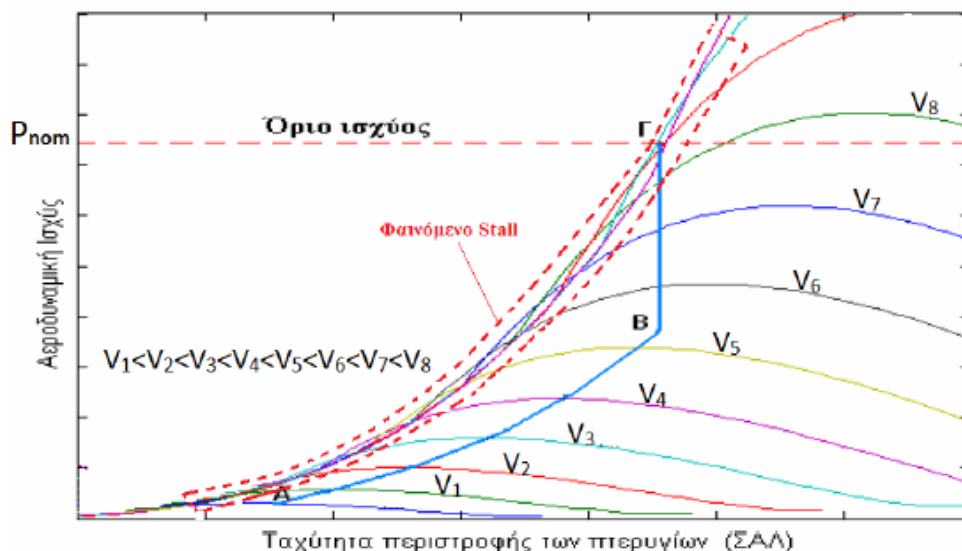
2.1.4 Λειτουργία μεταβλητών στροφών και βέλτιστη ενεργειακή απόδοση

Η λειτουργία μεταβλητών στροφών στις ανεμογεννήτριες έχει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια καθώς και στην ομαλή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η ρύθμιση στροφών ή αλλιώς η ρύθμιση συχνότητας σ' ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τη συνεχή προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος από τις γεννήτριες προς το φορτίο του συστήματος, ώστε η συχνότητα του να διατηρεί συνεχώς την κανονική της τιμή.

Στην περίπτωση που δεν υπήρχε ρυθμιστής τάσεως οι γεννήτριες δε θα μπορούσαν να δεχθούν μια αύξηση φορτίου, αφού αν έλειπε ο ρυθμιστής τάσεως, το άνοιγμα των βαλβίδων των στροβίλων τους θα έμενε σταθερό, με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η μηχανή, σε ενδεχόμενη αύξηση του φορτίου του συστήματος, και μείωση της συχνότητας στο σύστημα γενικά.

Όπως γίνεται αντιληπτό, αν μια γεννήτρια συνδέεται σ' ένα μεγάλο σύστημα, η ταχύτητα περιστροφής της είναι δεσμευμένη από την συχνότητα του συστήματος και ο ρυθμιστής στροφών στην ουσία ελέγχει την παραγόμενη ισχύ από τη γεννήτρια.

Για την εξασφάλιση της μέγιστης αεροδυναμικής ισχύς είναι απαραίτητη η μεταβολή της ταχύτητας των πτερυγίων. Θεωρώντας ως μεταβλητή την ταχύτητα του ανέμου μπορεί να χαραχθεί η οικογένεια καμπυλών της αεροδυναμικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων.



Εικόνα 2.21: Καμπύλες αεροδυναμικής ισχύς σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής

Από τις καμπύλες αυτές προκύπτει ότι η μέγιστη αεροδυναμική ισχύς επιτυγχάνεται σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Μέχρι ένα όριο ταχύτητας (V_5) βρίσκεται στα μέγιστα των καμπυλών από εκεί και μετά ανεβαίνει κάθετα μέχρι το όριο ισχύος. Δεν συνεχίζει να ακολουθεί τις τιμές ταχύτητας που δίνουν τη μέγιστη αεροδυναμική ισχύ για να αφήνει περιθώριο σε περίπτωση αιφνίδιου ανέμου.

Στο σχήμα λοιπόν αυτό διακρίνεται και το φαινόμενο stall των πτερυγίων (πύκνωμα των καμπυλών στο άνω όριο της περιοχής τους) το οποίο χρησιμοποιείται για τον περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος.

Συνθήκη μεγιστοποίησης μηχανικής ισχύς των πτερυγίων

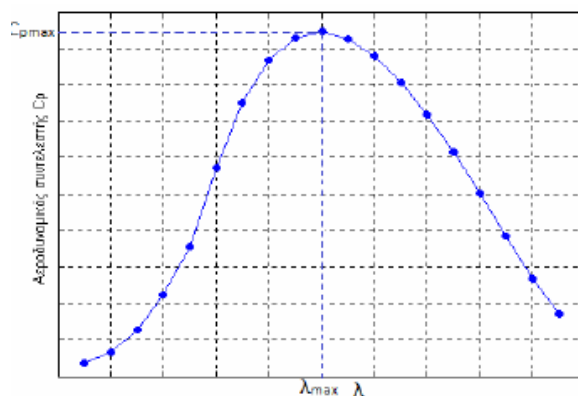
Αν θεωρηθεί η γωνία pitch σταθερή ο αεροδυναμικός συντελεστής των πτερυγίων εξαρτάται μόνο από το λ και δίνεται από τον τύπο:

$$C_p(\lambda) = C_{p,\max} \Rightarrow \frac{d}{d\lambda} C_p(\lambda) = 0 \Rightarrow \lambda = \lambda_{\max} \Rightarrow \frac{\omega_{opt} R}{U} = \lambda_{\max} \quad (2.38)$$

$$\text{και } \omega_{opt} = \frac{\lambda_{\max} U}{R} \Rightarrow \omega_{opt} \approx U \quad (2.39)$$

όπου λ_{\max} είναι ο μέγιστος λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου

και $C_{p,\max}$ είναι ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής



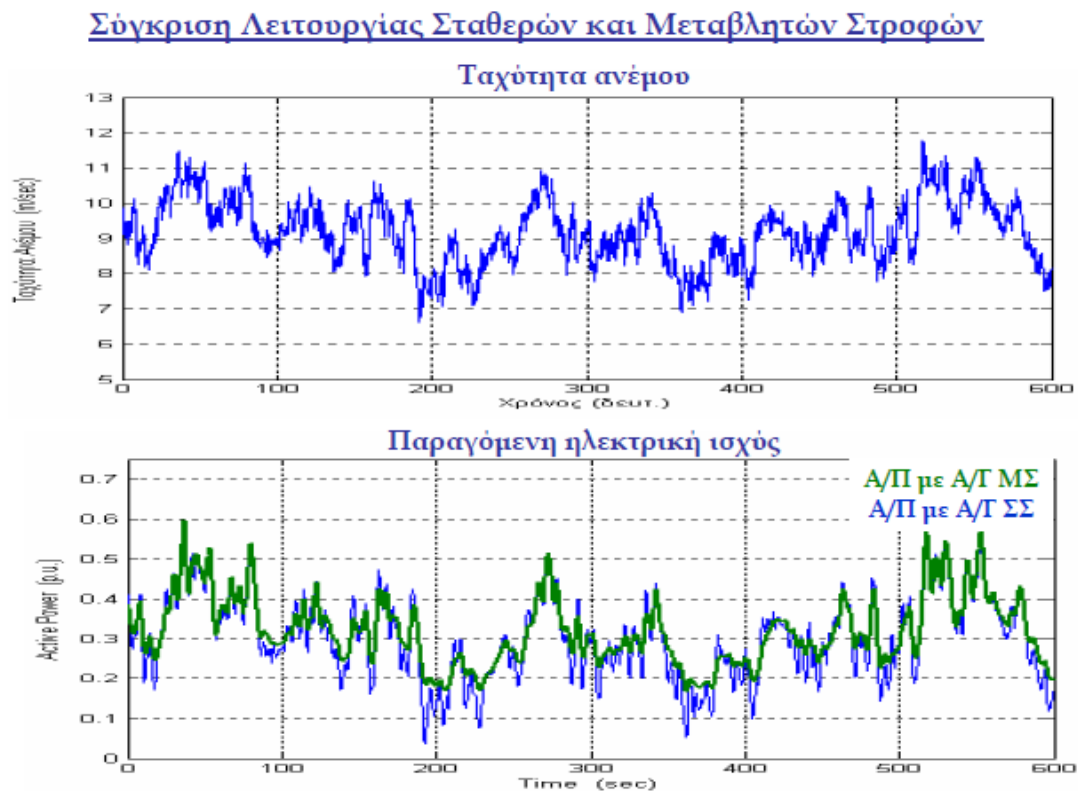
Εικόνα 2.22: Διάγραμμα C_p - λ



Εικόνα 2.23: Διάγραμμα ταχύτητας ανέμου-ταχύτητας πτερυγίων

Στον πίνακα 2.16 παρατηρείται ότι οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών δεν έχουν ηλεκτρονικά ισχύος όπως έχουν οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.

Η ισχύς της Α/Γ μεταβλητών στροφών, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζει πιο ομαλές μεταβολές από την ισχύ μιας Α/Γ σταθερών στροφών. Έτσι με τις Α/Γ ΜΣ μειώνονται οι καταπονήσεις και αυξάνεται η ποιότητα ισχύος. Εκτός αυτού έχουν μεγαλύτερη παραγωγή στους μεσαίους και χαμηλούς ανέμους ενώ στους υψηλούς όπως προαναφέρθηκε λειτουργούν σαν Α/Γ σταθερών στροφών.

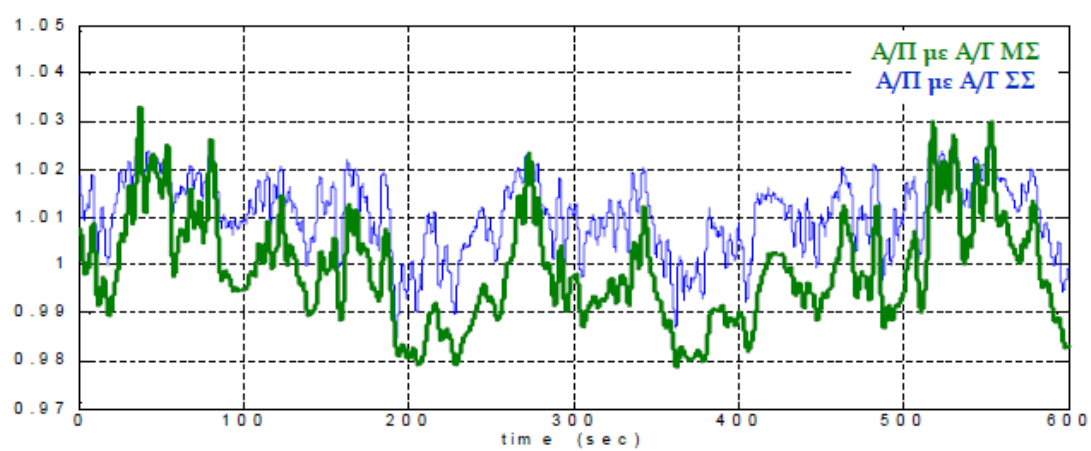


Εικόνα 2.24: Διάγραμμα μεταβολής τάσης στις Α/Γ ΣΣ και στις Α/Γ ΜΣ

Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών η μεταβολή της τάσης είναι ομαλότερη.

Σύγκριση Λειτουργίας Σταθερών και Μεταβλητών Στροφών

Τάση στο σημείο σύνδεσης του Α/Π



Εικόνα 2.25: Διάγραμμα τάσης στο σημείο σύνδεσης του Α/Π με Α/Γ ΣΣ και Α/Γ ΜΣ

2.2 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η εμφάνιση χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας εντοπίζεται πολύ παλιά. Ενδεικτικά αναφέρονται τα παθητικά συστήματα θέρμανσης, η ξήρανση τροφών ή και η πυρπόληση ρωμαϊκών πλοίων με τα κάτοπτρα του Αρχιμήδη που εστίαζαν την ηλιακή ακτινοβολία σε αυτά. Επίσης από το προηγούμενο αιώνα γίνεται χρήση πιο σύγχρονων συστημάτων όπως το 1878 στην έκθεση του Παρισιού όπου παρουσιάστηκε συσκευή η οποία εστίαζε την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν ατμολέβητα που κινούσε μια μηχανή η οποία έθετε σε λειτουργία ένα τυπογραφικό πιεστήριο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον γάλλο φυσικό Alexandre Edmond Becquerel το 1839, ο οποίος ανακάλυψε ότι μπορεί να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν συγκεκριμένες κατασκευές εκτεθούν στο φως.

Οι πετρελαϊκές κρίσεις της δεκαετίας του 70, οι αυξήσεις τιμών των καυσίμων και η συνειδητοποίηση ότι τα αποθέματα εξαντλούνται οδήγησαν στην στροφή προς την ηλιακή ενέργεια. Τότε, αρχές του 1970, σε διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ, εμφανίστηκε η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών ενώ αρκετά νωρίτερα το 1958, 108 ηλιακά κύτταρα είχαν σταλεί στο διάστημα για δοκιμή.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκμεταλλεύονται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια. Στο πλαίσιο των στόχων για το 2020 τα διεσπαρμένα Φωτοβολταϊκά συστήματα είναι δυνατόν να συνδεθούν άμεσα χωρίς νέα έργα στα δίκτυα διανομής μέχρι μία διείσδυση της τάξης του 30% του ελάχιστου φορτίου τις ώρες λειτουργίας χωρίς να δημιουργείται κάποιο πρόβλημα ενώ για περαιτέρω διείσδυση θα χρειαστούν τεχνικές λύσεις οι οποίες βρίσκονται ήδη σε ανάπτυξη. Η διείσδυση των διεσπαρμένων Φ/Β συστημάτων κυρίως στο δίκτυο διανομής αντικαθιστά ή αναβάλλει την επέκταση συμβατικών κεντρικών σταθμών παραγωγής το οποίο έχει θετικά αποτελέσματα για το περιβάλλον. Επιπλέον ιδιαίτερη αξία έχει η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τα Φ/Β όταν συμπίπτει με την αιχμή ζήτησης, όπως οι καλοκαιρινές αιχμές λόγω χρήσης κλιματιστικών. Η βαθμιαία ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών σταθμών καλύπτει αποτελεσματικά τη διαρκή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να καλυφθεί με μεγάλες επενδύσεις για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης με τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς βελτιώνεται η ποιότητα ισχύος και περιορίζονται οι ανάγκες για γραμμές μεταφοράς, καθώς η παραγωγή γίνεται κοντά στους χρήστες, οι οποίες έχουν πολύ υψηλό κόστος. Μια ιδανική λύση σε περιπτώσεις που αμφισβητείται η ασφάλεια παροχής είναι οι μικροί φωτοβολταϊκοί

σταθμοί καθώς η τοπική ηλεκτροπαραγωγή δεν δοκιμάζεται από δαπανηρές ενεργειακές απώλειες που αντιμετωπίζει το ηλεκτρικό δίκτυο. Στην Ελλάδα υπάρχει ένα ακόμα πλεονέκτημα στην παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω φωτοβολταϊκών, καθώς η μέγιστη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού συμπίπτει χρονικά με τις ημερήσιες αιχμές της ζήτησης, ειδικά τους θερινούς μήνες. Έτσι με τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων υπάρχει μια εξομάλυνση των αιχμών φορτίου, αποφεύγονται τα black-out και μειώνεται το συνολικό κόστος της ηλεκτροπαραγωγής δεδομένου ότι κάλυψη αυτών των μονάδων αιχμής είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

2.2.1 Χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας

Η εμφάνιση χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας εντοπίζεται πολύ παλιά. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα παθητικά συστήματα θέρμανσης, η ξήρανση τροφών ή και η πυρπόληση ρωμαϊκών πλοίων με τα κάτοπτρα του Αρχιμήδη που εστίαζαν την ηλιακή ακτινοβολία σε αυτά. Επίσης από το προηγούμενο αιώνα έχουμε τη χρήση πιο σύγχρονων συστημάτων όπως το 1878 στην έκθεση του Παρισιού όπου παρουσιάστηκε συσκευή η οποία εστίαζε την ηλιακή ακτινοβολία σε έναν ατμολέβητα που κινούσε μια μηχανή η οποία έθετε σε λειτουργία ένα τυπογραφικό πιεστήριο. Στην Αίγυπτο το 1913 κατασκευάστηκε μια μεγάλη ηλιακή ατμομηχανή 40kw για την λειτουργία ατμοκίνητης αρδευτικής αντλίας κλπ.

Με αφορμή τις πετρελαϊκές κρίσεις της δεκαετίας του 70, τις αυξήσεις τιμών των καυσίμων και τη συνειδητοποίηση ότι τα αποθέματα εξαντλούνται το ενδιαφέρον στράφηκε στην ηλιακή ενέργεια. Στις αρχές λοιπόν του 1970, εμφανίστηκε η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, σε διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ, τα οποία μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών ενώ αρκετά νωρίτερα το 1958, 108 ηλιακά κύτταρα είχαν σταλεί στο διάστημα για δοκιμή.

Οι τρόποι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε εσωτερική ενέργεια δομικών καταστάσεων (Παθητικά Ηλιακά Συστήματα) και στη δεύτερη ανήκουν αυτά που προκαλούν μετατροπή της σε άλλη μορφή ενέργειας κίνηση (Ενεργά Ηλιακά Συστήματα). Στα ενεργά ηλιακά συστήματα συγκαταλέγονται αυτά που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε εσωτερική ενέργεια θερμικού ρευστού (θερμοσιφωνικά συστήματα) και αυτά που μετατρέπουν το ηλιακό φως απ' ευθείας σε ηλεκτρισμό (φωτοβολταϊκά συστήματα).

Η εφαρμογή της ηλιακής παθητικής θέρμανσης στα κτίρια σε συνδυασμό με την κατάλληλη θερμομόνωση τους αποτελεί σήμερα πολύ σημαντικό στοιχείο της δομικής και θερμικής συμπεριφοράς του κτιρίου και λαμβάνεται υπόψη σε ενεργειακούς υπολογισμούς που αποβλέπουν σε εξοικονόμηση και αποδοτική διαχείριση της ενέργειας. Λόγω γεωγραφικών και κλιματολογικών συνθηκών, οι προοπτικές για την Ελλάδα είναι μεγάλες καθώς υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες για την ευρεία αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Μέχρι σήμερα μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν τα συστήματα παραγωγής θερμού νερού (ηλιακοί θερμοσίφωνες) αλλά και παθητικά συστήματα σε σπίτια, θερμοκήπια κλπ.

Κύρια Χαρακτηριστικά

Στην επιφάνεια του ήλιου γίνονται θερμοπυρηνικές αντιδράσεις όπου εκλύουν ενέργεια με τη μορφή ισχυρής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολούμενη ενέργεια προέρχεται από τη μετατροπή 654 εκατομμυρίων τόνων υδρογόνου σε 650 εκατομμύρια τόνους ηλίου ανά δευτερόλεπτο στο εσωτερικό της ηλιακής σφαίρας. Η διαφορά των 4 εκατομμυρίων τόνων όπου είναι ένα μικρό μόνο κλάσμα της αρχικής μάζας της αρχικής ποσότητας υδρογόνου μετατρέπεται σε ενέργεια με ισοδύναμη θερμαντική αξία 20 τόνων άνθρακα για κάθε γραμμάριο αερίου υδρογόνου που χάνεται.

Η επιφάνεια του ήλιου αγγίζει θερμοκρασίες 6000°C ενώ η επιφάνεια της γης βρίσκεται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες με μέση τιμή 7°C . Το μέρος της γης που βλέπει τον ήλιο δέχεται μια συνολική ακτινοβολία επειδή υπάρχει αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά ίση με 173.000 TW ενώ η συνολική ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι περίπου 121.000 TW. Προκειμένου να καλυφθούν όλες οι ανάγκες της ανθρωπότητας αρκεί η εκμετάλλευση μόλις του 0,000001 αυτής της ενέργειας και με βαθμό απόδοσης 10%. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να είναι η πρώτη ενεργειακή πηγή και ιδεατά η μόνη για θέρμανση, ηλεκτρισμό κλπ.

Από τη συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη το 30% αυτής χωρίς να αλλάξει μήκος κύματος ανακλάται από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας προς το διάστημα και το 0,02% μπαίνει στο βιολογικό σύστημα για φωτοσύνθεση. Το 47% απορροφάται από την ατμόσφαιρα το οποίο ανυψώνει τη θερμοκρασία και στη συνέχεια ακτινοβολείτε πίσω στο διάστημα. Το υπόλοιπο 23% γίνεται κινητήρια δύναμη των ανέμων, ρευμάτων, κυμάτων, διαμορφώνει το κλίμα και προκαλεί τον υδρολογικό κύκλο ενώ στο τέλος και αυτή η ενέργεια ακτινοβολείτε πίσω στο διάστημα.

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το φάσμα της εκπομπής μέλανος σώματος που βρίσκεται σε θερμοκρασία 6000°C . Εκτείνεται από τα 200nm της υπεριώδους ακτινοβολίας και φθάνει συνεχές μέχρι τα 3000nm της υπέρυθρης και έχει αιχμή στα 500nm.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στα όρια της ατμόσφαιρας της γης έχει μέση τιμή $1395\text{W}/\text{m}^2$ και έχει την ονομασία ηλιακή σταθερά ενώ διαφοροποιείται ελάχιστα ανάλογα της μεταβολής της απόστασης του ηλίου και της δραστηριότητας των ηλιακών κηλίδων. Η ατμόσφαιρα προφανώς μειώνει την έντασή της όταν φθάνει στη γη. Αυτή η απορρόφηση οφείλεται στα αιωρούμενα σωματίδια ή σύννεφα τα οποία απορροφούν ενέργεια καθώς ο ατμός νερού την απορροφά σε αντίθεση με τα κύρια αέρια

της ατμόσφαιρας, το οξυγόνο και το άζωτο που δεν την απορροφούν. Τελικά η ηλιακή σταθερά στο επίπεδο της γης φθάνει την τιμή $1000W / m^2$. Βέβαια σε κάθε τόπο πάνω στη γη η ετήσια ακτινοβολία είναι συνάρτηση των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής και της γεωγραφικής θέσης του τόπου.

Η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τη Γη και την ατμόσφαιρα της σε ένα χρόνο είναι 10 – 15 φορές περισσότερη από την ενέργεια που μπορούν να δώσουν τα ορυκτά καύσιμα. Φυσικά δεν είναι όλη αυτή η ενέργεια εκμεταλλεύσιμη και αυτό οφείλεται στις τεχνολογικές αδυναμίες οι οποίες έχουν ως συνέπεια να γίνεται δυνατή η μετατροπή μόνο του 5 – 15% της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Μειονεκτήματα

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ότι η ενέργεια παρουσιάζει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις τόσο μέσα στη μέρα όσο και ανάλογα την εποχή και τη γεωγραφική θέση. Εντός του εικοσιτετράωρου υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ της μέγιστης τιμής, κατά τη διάρκεια των ευνοϊκότερων συνθηκών της μέρας και της μηδενικής τιμής που αποκτά τη νύκτα. Η εποχή του χρόνου είναι ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει τα ποσά ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, αφού προφανώς την Άνοιξη και ακόμα περισσότερο το Καλοκαίρι η ακτινοβολία του ήλιου βρίσκεται σε πολύ υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με το Χειμώνα και το Φθινόπωρο. Όσο αναφορά τη γεωγραφική θέση ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που δείχνει τη διαφορά είναι ο Ισημερινός με τις βόρειες χώρες της Ευρώπης καθώς στον Ισημερινό εντοπίζονται τριπλάσιες τιμές απ' ότι στις βορειότερες χώρες της Ευρώπης. Τέλος υπάρχει διακύμανση και στην σχέση της έμμεσης προς την άμεση ηλιακή ακτινοβολία όπως για παράδειγμα στη Μεγάλη Βρετανία όπου το χειμώνα η έμμεση (διάχυτη) είναι το 85% της ολικής ακτινοβολίας (διάχυτη + άμεση).

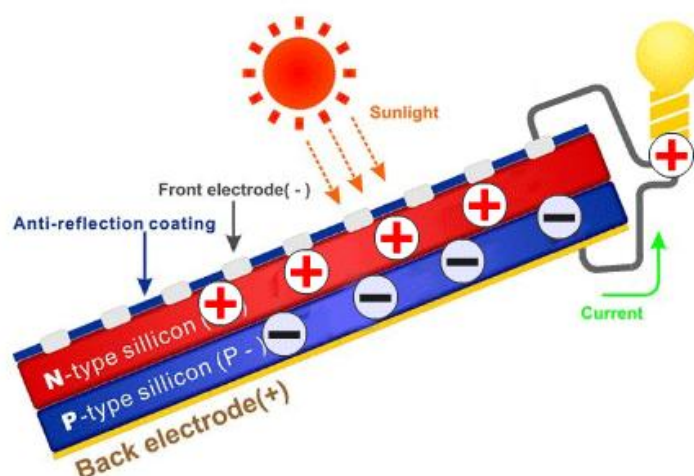
Δεύτερο σημαντικό χαρακτηριστικό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη είναι η αραιή μορφή της. Για παράδειγμα η θερμική ισχύς που μεταδίδεται μέσω $1m^2$ θερμαινόμενης επιφάνειας ενός ατμοσφαιρικού αερίου είναι περίπου 35 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη ισχύ της ακτινοβολίας στο ίδιο εμβαδόν στην επιφάνεια της γης.

Τα δυο αυτά χαρακτηριστικά (μειονεκτήματα), δηλαδή η χρονική διακύμανση και η χαμηλή πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι τα κύρια αίτια προβλημάτων που παρουσιάζονται στη πράξη κατά την εφαρμογή μετατροπής κλπ.

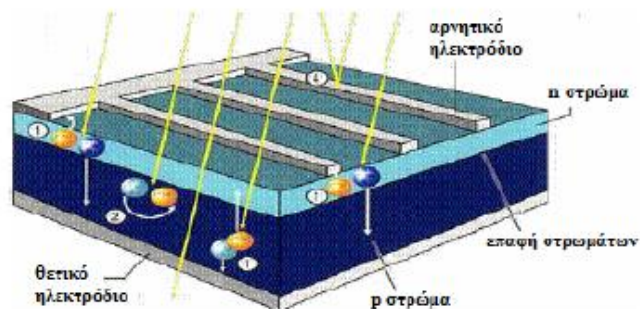
2.2.2 Φωτοβολταϊκό στοιχείο και Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Κάθε φωτοβολταϊκός σταθμός αποτελείται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών πλαισίων που λέγονται φωτοβολταϊκά στοιχεία και μπορεί να περιλαμβάνει ανάλογα με τη χρήση, ένα μετατροπέα για τη μετατροπή του συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα, ρυθμιστές τάσης και ρεύματος, διατάξεις ελέγχου και συστοιχίες συσσωρευτών για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όταν δεχτούν ακτινοβολία. Συγκεκριμένα όταν τα φωτόνια μιας ακτινοβολίας πέσουν στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου άλλα ανακλώνται, άλλα διαπερνούν το ημιαγωγίμο υλικό κατασκευής του στοιχείου και άλλα απορροφώνται από αυτό. Τα φωτόνια αυτά εξαναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού να μετακινηθούν με την ενέργεια που τους δίνουν, οπότε δημιουργείται κίνηση ηλεκτρονίων. Αυτή η κίνηση (ροή) των ηλεκτρονίων είναι το ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για τη λειτουργία συσκευών.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώματα ημιαγωγού σφιχτά συνδεδεμένα μαζί. Ως κυριότερος ημιαγωγός χρησιμοποιείται το πυρίτιο και προσμίξεις με φώσφορο (n-type) και βόριο (p-type). Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από ένα πολύ λεπτό στρώμα πυριτίου n-type που έχει πληθώρα ηλεκτρονίων, επάνω από ένα παχύτερο στρώμα πυριτίου p-type που έχει έλλειψη ηλεκτρονίων. Ουσιαστικά πρόκειται για μια ένωση pn. Στην επιφάνεια επαφής των δύο υλικών που λέγεται και junction δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο.



Εικόνα 2.26: Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου



Εικόνα 2.27: Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων κυμαίνεται από 8-18% αναλόγως της τεχνολογίας τους. Το ακριβές ποσοστό της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική εξαρτάται από το είδος των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιούνται.

Τα Φ/Β στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά, όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, ή χημικές ενώσεις αρσενικούχου γάλλιου, φωσφορούχου γάλλιου, φωσφορούχου ίνδιου, κ.ά. Σε αυτά τα ημιαγώγιμα υλικά ενσωματώνονται προσμείξεις άλλων στοιχείων και έτσι αποκτούν την ιδιότητα να εμφανίζουν μικρή τάση στα άκρα τους, όταν πέσει πάνω τους ηλιακή ακτινοβολία ή φωτιστούν από κάποια άλλη πηγή φωτός. Η τάση αυτή στην περίπτωση Φ/Β στοιχείων πυριτίου είναι 0,5V, δηλαδή πολύ μικρή. Για το λόγο αυτό συνδέονται πολλά Φ/Β στοιχεία μαζί και σχηματίζουν τη Φ/Β συστοιχία ή Φ/Β σύστημα, οπότε η παραγόμενη τάση είναι μεγαλύτερη. Τα Φ/Β στοιχεία διακρίνονται σε:

Συμβατικά Φ/Β (μεγάλου πάχους)

- **Μονοκρυσταλλικού πυριτίου:** Κατασκευάζονται από κυψέλες που έχουν κοπεί από ένα μόνο μεγάλο κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου. Η κατασκευή τους είναι πιο πολύπλοκη, με αποτέλεσμα το υψηλότερο κόστος παραγωγής.



Εικόνα 2.28: Ράβδος πολυκρυσταλλικού πυριτίου



Εικόνα 2.29: Μονοκρυσταλλικά πάνελ

Χαρακτηριστικά:

- Είναι ο πρώτος τύπος φωτοβολταϊκών πάνελ που μπήκε σε μαζική παραγωγή.
- Έχουν καλύτερη σχέση απόδοσης/ επιφάνειας από τους άλλους τύπους πάνελ.
- Η ενεργειακή απόδοσή τους κυμαίνεται από 11% - 19%
- Έχουν μεγαλύτερο πάχος υλικού καθώς και υψηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά πάνελ.
- Έχουν σκούρο μπλε ή μαύρο χρώμα.

- **Πολυκρυσταλλικού πυριτίου:** Κατασκευάζονται από κυψέλες που έχουν κοπεί σε λεπτά τμήματα, από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλοποιημένου πυριτίου (το λιωμένο πυρίτιο χύνεται σε καλούπι και στη συνέχεια τεμαχίζεται σε κυψέλες).



Εικόνα 2.30: Λειωμένο πυρίτιο



Εικόνα 2.31: Πολυκρυσταλλικά πάνελ

Χαρακτηριστικά:

- Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών, για αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη.
- Η ενεργειακή απόδοσή τους που κυμαίνεται από 11% - 16% είναι σχετικά μικρότερη από αυτή των μονοκρυσταλλικών, αλλά από τη στιγμή που οι κυψέλες τοποθετούνται μέσα σε ένα πάνελ με άλλες 60, η πραγματική διαφορά σε watt ανά τετραγωνικό μέτρο είναι αμελητέα. Σήμερα, με την ταχύτατη ανάπτυξη της τεχνολογίας, η απόδοσή τους τείνει να αγγίζει την απόδοση των μονοκρυσταλλικών.
- Είναι τα πλέον διαδεδομένα πάνελ παγκοσμίως.
- Έχουν την καλύτερη σχέση κόστους-απόδοσης.
- Έχουν γαλάζιο χρώμα.

Ταινίας πυριτίου

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων, η οποία προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%



Φωτοβολταϊκά στοιχεία
ταινίας πυριτίου



Φωτοβολταϊκά στοιχεία
μονοκρυσταλλικού πυριτίου



Φωτοβολταϊκά στοιχεία
πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Εικόνα 2.32: Συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

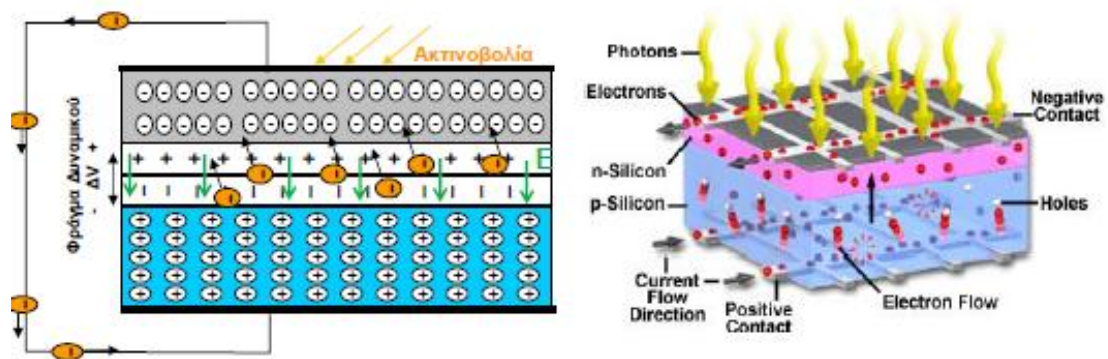
- **Φ/B thin film:** Πρόκειται για μια ευρύτερη κατηγορία, που περιλαμβάνει τα λεγόμενα πάνελ «τρίτης γενιάς» που προέρχονται από πολλές διαφορετικές μεθόδους παραγωγής και επεξεργασίας (π.χ. άμορφου πυριτίου (a-Si), Δισεληνοϊνδιούχου χαλκού (CuInSe_2 ή CIS), Τελουριούχου Καδμίου (CdTe), Αρσενικούχου Γαλλίου (GaAs) κλπ). Τα πάνελ άμορφου πυριτίου που είναι και τα πλέον διαδεδομένα αυτής της κατηγορίας, αποτελούνται από ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως από γυαλί ή αλουμίνιο. Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται απ' τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου.
- **Χαρακτηριστικά:**
 - Έχουν, ονομαστικά, χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες (6%εώς11%)
 - Λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή τους, η τιμή τους είναι αισθητά χαμηλότερη.
 - Τα πάνελ λεπτού υμενίου έχουν καλύτερες αποδόσεις σε σχέση με τα

- κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά , όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).
- Έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά.
- Δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις, σχετικά με τις αποδόσεις και τη διάρκειά τους, αφού η τεχνολογία τους είναι σχετικά καινούρια.
- Αποτελούν καλή λύση όταν υπάρχει μεγάλος διαθέσιμος χώρος, σκιάσεις, δυσμενής προσανατολισμός.

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων μοιάζει με την λειτουργία των ηλεκτρικών συσσωρευτών, αφού και οι δύο διατάξεις δίνουν ηλεκτρική ενέργεια. Στον ηλεκτρικό συσσωρευτή γίνονται χημικές αντιδράσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων και του διαλύματος και η παραγόμενη ενέργεια αποθηκεύεται στα ηλεκτρόδια. Η ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται με σταθερή ηλεκτρική τάση και ανάλογα με την αντίσταση η ένταση του ρεύματος κυμαίνεται από πολύ μικρές έως πολύ μεγάλες τιμές. Αντίθετα το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει την ιδιότητα να διατηρεί σταθερή την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, προσαρμόζοντας την τάση στα άκρα της αντίστασης. Γενικά ο ηλεκτρικός συσσωρευτής είναι μια πηγή σταθερής ηλεκτρικής τάσεως και το φωτοβολταϊκό στοιχείο μια πηγή σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος.

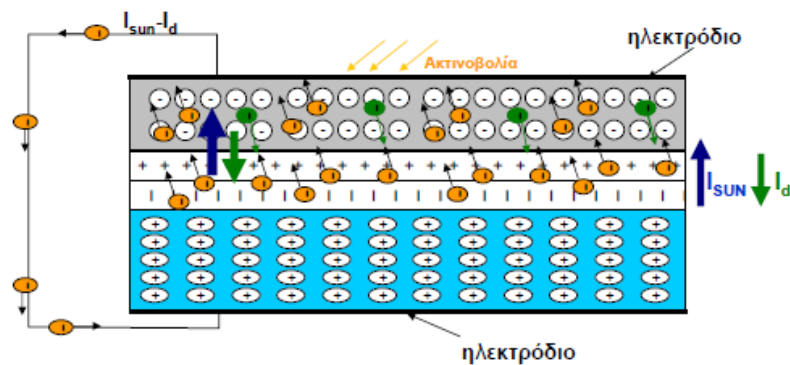
Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Κατά την πρόσκρουση του ηλιακού φωτός στο διαστρωματομένο φωτοβολταϊκό στοιχείο, απελευθερώνονται ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινηθούν τυχαία. Ηλεκτρόνια κοντά στην επαφή p n ωθούνται από το σταθερό πεδίο προς το στρώμα n αλλά δεν μπορούν να επιστρέψουν προς την άλλη κατεύθυνση, γιατί η κίνηση αυτή είναι αντίθετη στην κλίση πεδίου, και έτσι προκύπτει ανισορροπία φορτίου μεταξύ των δύο περιοχών. Τα επιπλέον ηλεκτρόνια εντός του στρώματος n -type έχουν μια φυσική τάση να αφήσουν το στρώμα, ώστε να διορθωθεί η ανισορροπία φορτίου. Με την παροχή ενός εξωτερικού κυκλώματος αυτά τα ηλεκτρόνια μπορούν να επιστρέψουν στο άλλο στρώμα, με αποτέλεσμα τη ροή του ρεύματος η οποία θα συνεχιστεί όσο φως προσκρούει το Φ/Β στοιχείο. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από μεταλλικό αγωγίμο πλέγμα που εφαρμόζεται στις εξωτερικές όψεις των δύο στρωμάτων του Φ/Β στοιχείου. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται άμεσα από την ενέργεια του φωτός.



Εικόνα 2.33: Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα από την ηλεκτρική ακτινοβολία απελευθερώνονται και έχουν την τάση να κινηθούν προς τον ημιαγωγό τύπου n λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που έχει αναπτυχθεί περί της περιοχής απογύμνωσης. Αυτή η ροή ηλεκτρικών φορέων αντιστοιχεί στο λεγόμενο φωτόρευμα I_{sun} . Όμως καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου n κάποια από αυτά αναγκάζονται να κινηθούν προς την αντίθετη φορά δηλαδή από την περιοχή τύπου n στην περιοχή τύπου p παράγοντας έτσι το ρεύμα διάχυσης I_d . Το ρεύμα διάχυσης υπακούει στις σχέσεις που διέπουν το ρεύμα ορθά πολωμένης διόδου.

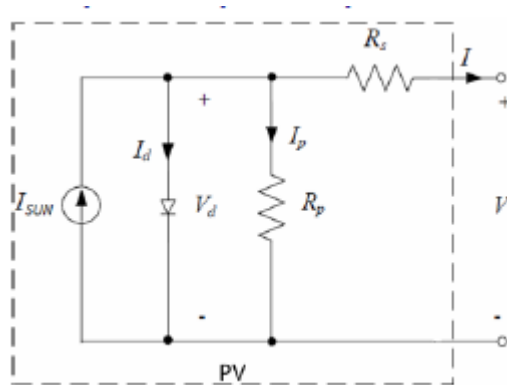


Εικόνα 2.34: Φωτόρευμα και Ρεύμα Διάχυσης

2.2.3 Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όπως προαναφέρθηκε η τάση των Φ/Β στοιχείων μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω αν παραμένει σταθερή η ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται.

Το παρακάτω κύκλωμα είναι το ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου που αποτελείται από μία ιδανική πηγή ρεύματος, που δίνει ρεύμα I_{sun} , ανάλογο της ηλιακής έντασης (φωτόρευμα), παράλληλα συνδεδεμένη με μία δίοδο και μία ωμική αντίσταση R_p .



Εικόνα 2.35: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η αντίσταση R_p αντιπροσωπεύει το ρεύμα διαρροής εντός του Φ/Β στοιχείου, την απόκλιση δηλαδή από το ρεύμα που θα έπρεπε να παίρνουμε από ένα ιδανικό Φ/Β στοιχείο. Εκτός από την αντίσταση αυτή υπάρχει και μία αντίσταση R_s που οφείλεται στην αντίσταση μεταξύ του Φ/Β στοιχείου και των ακροδεκτών του και στην αντίσταση του ημιαγωγού (του υλικού κατασκευής του Φ/Β στοιχείου).

Το ρεύμα στην έξοδο του Φ/Β στοιχείου θα δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_{sun} - I_d - I_p = I_{sun} - I_d - \frac{V_d}{R_p} \quad (2.38)$$

Γνωρίζοντας ότι:

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_d \cdot q}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.39)$$

Όπου,

I_s είναι το ρεύμα ανάστροφου κόρου, q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, k είναι σταθερά Boltzman και T είναι η θερμοκρασία ($^{\circ}C$).

Άρα το ρεύμα του Φ/Β στοιχείου υπολογίζεται από την σχέση

$$I = I_{sun} - I_s \left(e^{\frac{V_d \cdot q}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad (2.40)$$

Επίσης για την εσωτερική τάση V_d του Φ/Β στοιχείου και την τάση στα άκρα του ισχύει:

$$V = V_d - I \cdot R_s \quad (2.41)$$

Για απώλειες μικρότερες του 1% αποδεικνύεται μία καλή προσέγγιση για τις R_s και R_p είναι:

$$R_s < \frac{0.01 \cdot V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.42)$$

$$R_p > \frac{100 \cdot V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.43)$$

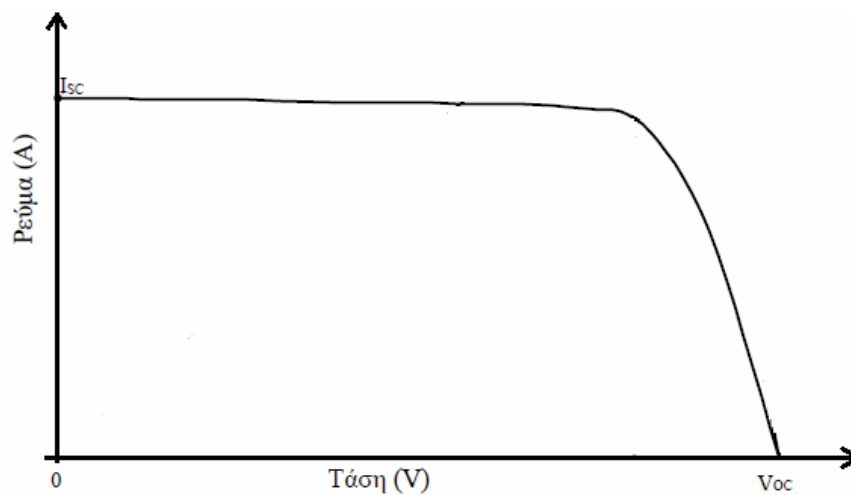
Όπου V_{oc} είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης η οποία προκύπτει από την επίλυση της

$$I = I_{sun} - I_s \left(e^{\frac{V_d \cdot q}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad \text{για } I=0 \text{ και } V_d = V_{oc} \quad (2.44)$$

και I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Μπορούμε προσεγγιστικά να θεωρήσουμε

$$I_{sc} = I_{sun}.$$

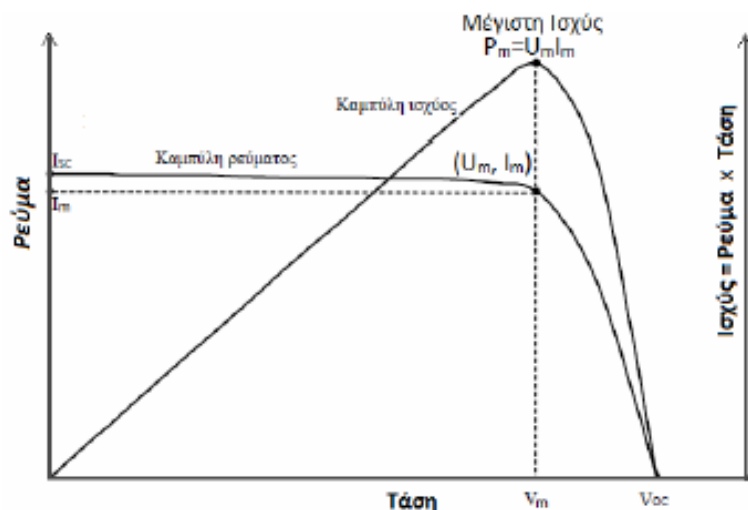
Οι μεταβολές έντασης και τάσης σχηματίζουν μια διαγραμματική καμπύλη που αποτελεί τη χαρακτηριστική καμπύλη του Φ/Β στοιχείου.



Εικόνα 2.36: Χαρακτηριστική καμπύλη Φ/Β στοιχείου

Όταν το κύκλωμα είναι υπό βραχυκύκλωση τότε η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος παίρνει μέγιστη τιμή I_{sc} και η ηλεκτρική τάση μηδενίζεται ($V=0$). Όταν το κύκλωμα είναι ανοικτό όμως η ένταση μηδενίζεται ($I=0$) και η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή V_{oc} .

Στην επόμενη γραφική παράσταση παρατίθεται μαζί τη καμπύλη ρεύματος – τάσης και η καμπύλη της ισχύος που παράγει το Φ/Β στοιχείο με την τάση στα άκρα του.

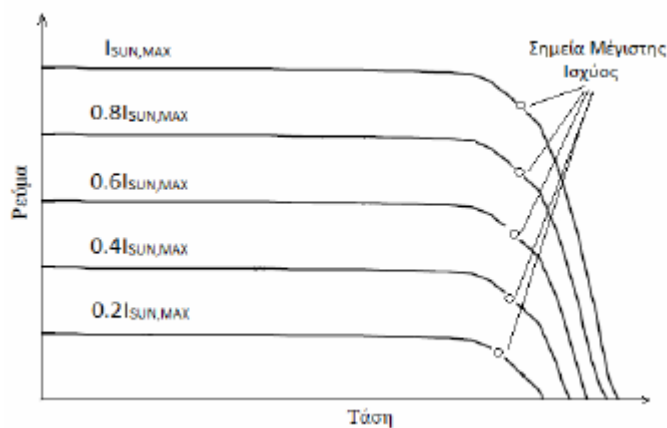


Εικόνα 2.37: Καμπύλη ισχύος στο διάγραμμα της χαρακτηριστική καμπύλης Φ/Β

Το σημείο λειτουργίας με μέγιστη ισχύ είναι συγκεκριμένο και αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό ζεύγος τιμών τάσης και ρεύματος (U_m, I_m).

Το σημείο λειτουργίας (U_m, I_m) με μέγιστη ισχύ ταυτίζεται με το γόνατο της καμπύλης ρεύματος- τάσεως.

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες λειτουργίας μέγιστης ισχύος με μεταβαλλόμενη ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 2.38: Καμπύλες λειτουργίας μέγιστης ισχύος

Το ρεύμα του φ/β στοιχείου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I = I_{SUN} - I_s \left(e^{\frac{V_d \cdot q}{k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad (2.45)$$

Όμως $P_m = U_m \cdot I_m$ και με την υπόθεση ότι $R_s = 0 \rightarrow V_d = V$ ισχύει ότι:

$$I_m = I_{SUN} - I_s \left(e^{\frac{P_m \cdot q}{I_m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{P_m}{I_m \cdot R_p} \quad (2.46)$$

Η τάση του φωτοβολταϊκού στοιχείου επηρεάζεται φυσικά από την θερμοκρασία.

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι διαφορετική από αυτή του περιβάλλοντος και μπορεί να εκτιμηθεί με την επόμενη σχέση

$$T_{\phi/\beta \text{ στοιχείου}} = T_{\alpha \epsilon \rho \alpha} + \frac{T_{NOCT} - 20}{80} \cdot H_0 \quad (2.47)$$

Όπου,

H_0 είναι η ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φ/β πλαισίου.

T_{NOCT} είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β πλαισίου η οποία είναι συνήθως $45^\circ C$

Η εξάρτηση της τάσης λειτουργίας των φ/β στοιχείων από τη θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση

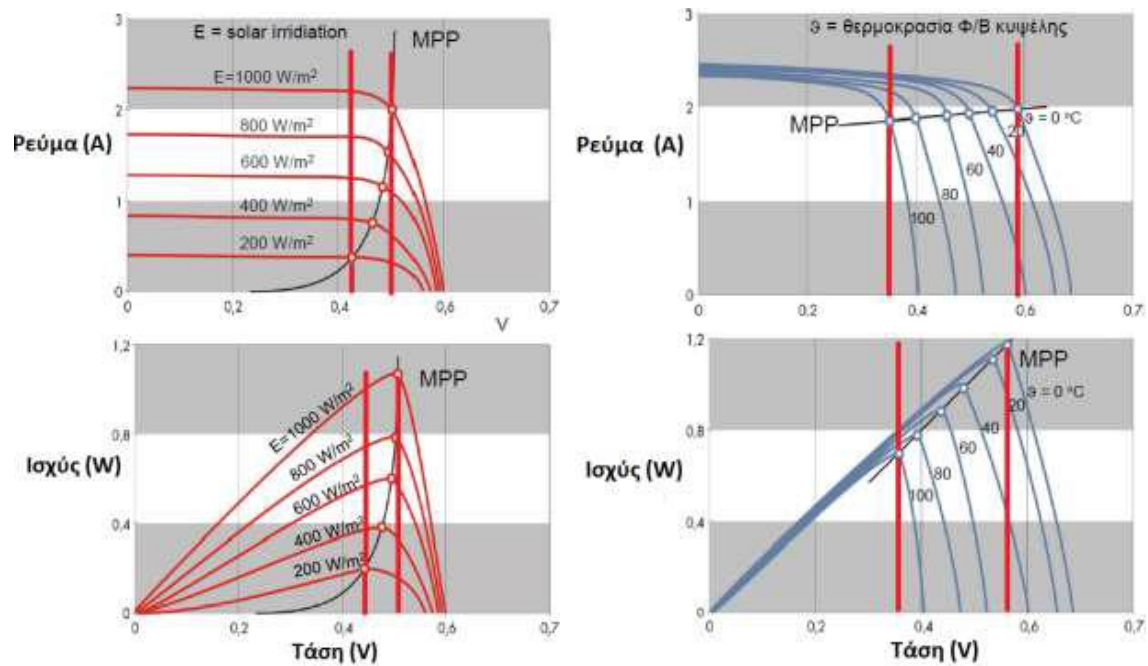
$$V(T_x) = V(25^\circ C) [1 + V_{TC} \cdot (T_x - 25)] \quad (2.48)$$

όπου

V_{TC} είναι η τιμή του θερμοκρασιακού συντελεστή τάσης του φ/β πλαισίου και

T_x είναι η θερμοκρασία του υλικού των φ/β στοιχείων

Η επίδραση της θερμοκρασίας καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας στην τάση λειτουργίας φαίνεται στα επόμενα διαγράμματα.



Εικόνα 2.39: Διαγράμματα Ρεύματος- Τάσης και Ρεύματος –Ισχύος

2.2.4 Κατασκευαστική δομή Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

2.2.4.1 Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Η μικρή τάση και ισχύς που παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν αρκούν για την τροφοδότηση συνηθισμένων φορτίων ή για την απευθείας σύνδεση τους με το δίκτυο. Για να επιτευχθεί λοιπόν μεγαλύτερη τάση και ισχύς συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα φ/β στοιχεία και έτσι συντίθεται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο(πάνελ).

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από φ/β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ώστε να παράγεται μεγαλύτερη τάση. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο παράγει περίπου 0.6 V, ο συνδυασμός N_s φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά (στοιχειοσειρά ή string) και N_p στοιχειοσειρών παράλληλα (αύξηση του ρεύματος) αποτελεί ένα φ/β συλλέκτη.

Έστω ότι ο φ/β συλλέκτης αποτελείται από N_p στοιχειοσειρές των N_s φ/β πλαισίων τότε η τάση του φ/β συλλέκτη θα δίνεται από τη σχέση

$$U_{\sigma} = N_s \cdot U_{\pi} \quad (2.49)$$

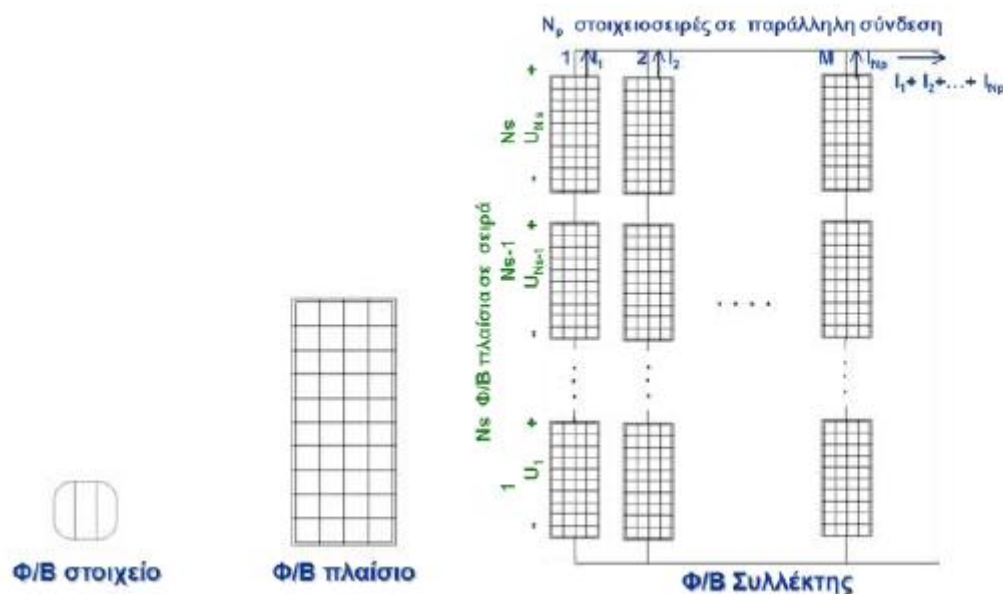
Ενώ το ρεύμα του φ/β συλλέκτη θα δίνεται από τη σχέση

$$I_{\sigma} = N_p \cdot I_{\pi} \quad (2.50)$$

Όπου,

U_{π} η τάση ενός πλαισίου

I_{π} το ρεύμα ενός πλαισίου



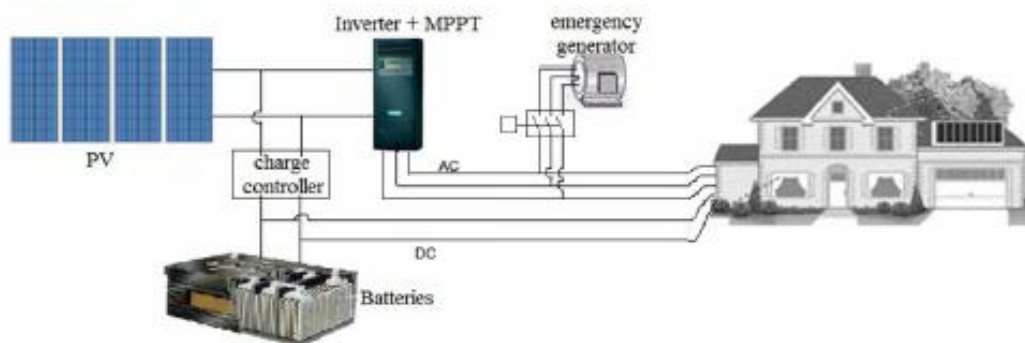
Εικόνα 2.40: Διάταξη φ/β στοιχείων σε πλαίσια και συλλέκτες

Κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα λοιπόν αποτελείται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών πλαισίων (πάνελ) και ανάλογα με το αν το σύστημα είναι διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο ή όχι ή με το αν εξυπηρετεί κάποιο απομονωμένο φορτίο μπορεί να περιλαμβάνει:

- Μετατροπέα συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (Inverter) ο οποίος είναι απαραίτητος για διασυνδεδεμένα φ/β συστήματα και όπου χρειάζεται εναλλασσόμενο ρεύμα.
- Ρυθμιστές τάσης και ρεύματος
- Διατάξεις ελέγχου
- Συστοιχίες συσσωρευτών για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας (σε αυτόνομα μη διασυνδεδεμένα συστήματα).

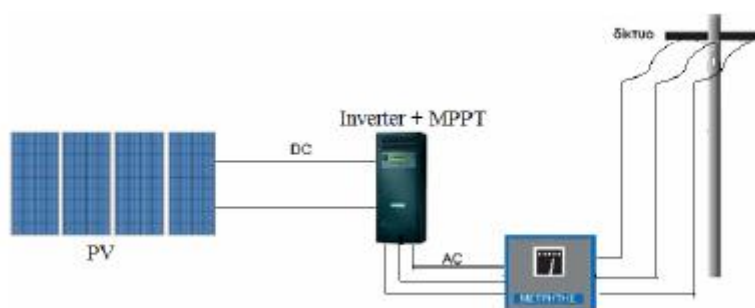
Τα φωτοβολταϊκά κατατάσσονται ανάλογα με τη χρήση του παραγόμενου ρεύματος σε:

- **Αυτόνομα συστήματα**, των οποίων η παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται επιτόπου και εξ' ολοκλήρου από την παραγωγή στην κατανάλωση. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από μια συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων, έναν αντιστροφέα (inverter) για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, μια συστοιχία συσσωρευτών για να αποθηκεύει την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια και μια εφεδρική ηλεκτρογεννήτρια.

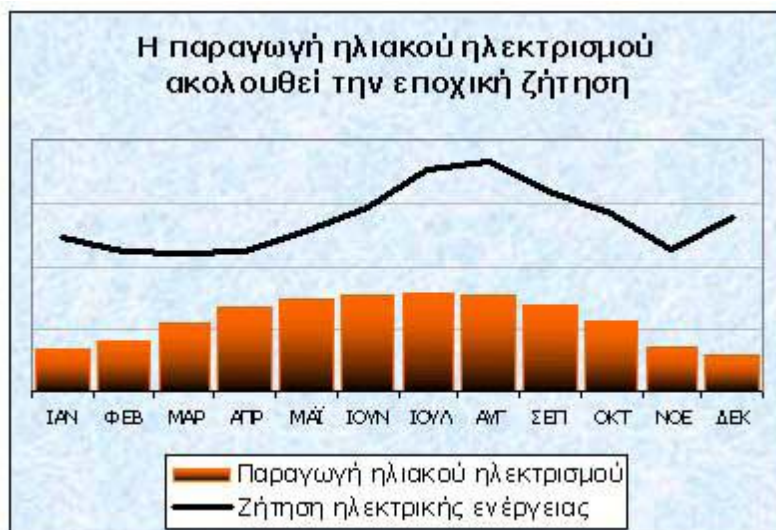


Εικόνα 2.41: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

- **Διασυνδεδεμένα συστήματα** με το δίκτυο, τα οποία συνδέονται και λειτουργούν παράλληλα με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Δεν διαθέτουν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας οπότε έχουν αναλώσιμα υλικά. Υπάρχουν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις, ανάλογα με το αν τροφοδοτείται κάποιο φορτίο απευθείας από το σύστημα ή όχι. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται προς όφελος του ιδιοκτήτη ενώ η πλεονάζουσα ή ακόμα και όλη πωλείται στο δίκτυο. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από μια συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων, έναν αντιστροφέα (inverter) για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο και έναν μετρητή που καταγράφει την παραγόμενη ενέργεια σε kwh που διαχέεται στο δίκτυο, αλλά δεν απαιτείται χρήση μπαταριών αφού το δίκτυο έχει πρακτικά απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης.



Εικόνα 2.42: Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο



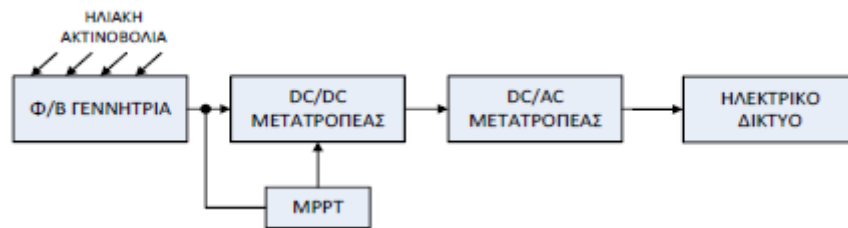
Εικόνα 2.43: Ζήτηση ηλεκτρισμού- Εποχή

Η λειτουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου ελέγχεται από συσκευές προστασίας και ρύθμισης της τάσης, που έχουν σκοπό να παρέχουν στους καταναλωτές ηλεκτρική ενέργεια αποδεκτής ποιότητας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό σφαλμάτων και προσφέροντας υψηλό επίπεδο ασφαλείας. Η σύνδεση των μονάδων θα πρέπει να συμβαδίζει με αυτές τις γενικές αρχές ώστε να μην προκαλούνται προβλήματα στους υπόλοιπους καταναλωτές αλλά και να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

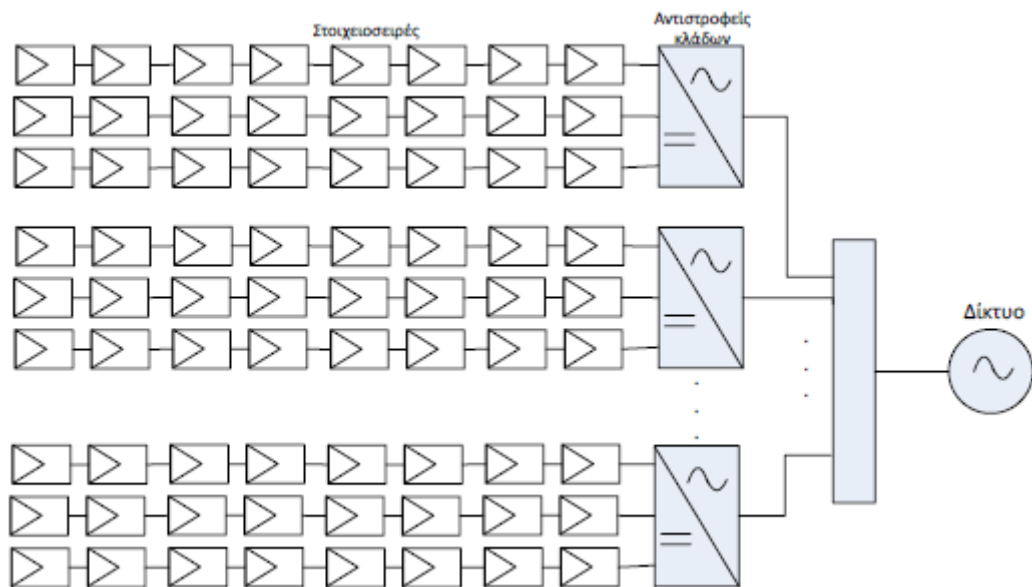
Τυπική διάταξη διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος

Το ηλεκτρικό μέρος των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελείται από:

- Συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων
- DC/DC μετατροπείς και αντιστροφεείς (inverters) για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο
- Σύστημα γείωσης
- Αντικεραυνική προστασία
- Ενδεχομένως μετασχηματιστή 0.4/20kV
- Μετρητή της παραγόμενης ενέργειας που διοχετεύεται στο δίκτυο
- Διατάξεις ελέγχου καταγραφής και απεικόνισης δεδομένων



Εικόνα 2.44: Αρχή λειτουργίας των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων



Εικόνα 2.45: Συνδεσμολογία στοιχειοσειρών στους αντιστροφέας

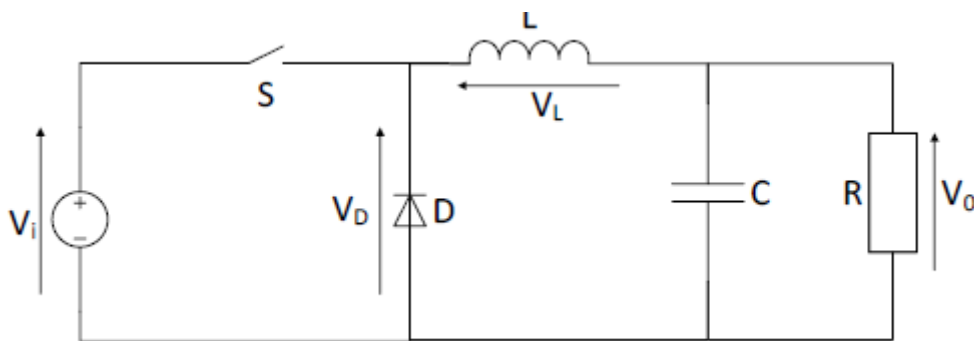
2.2.4.2 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς

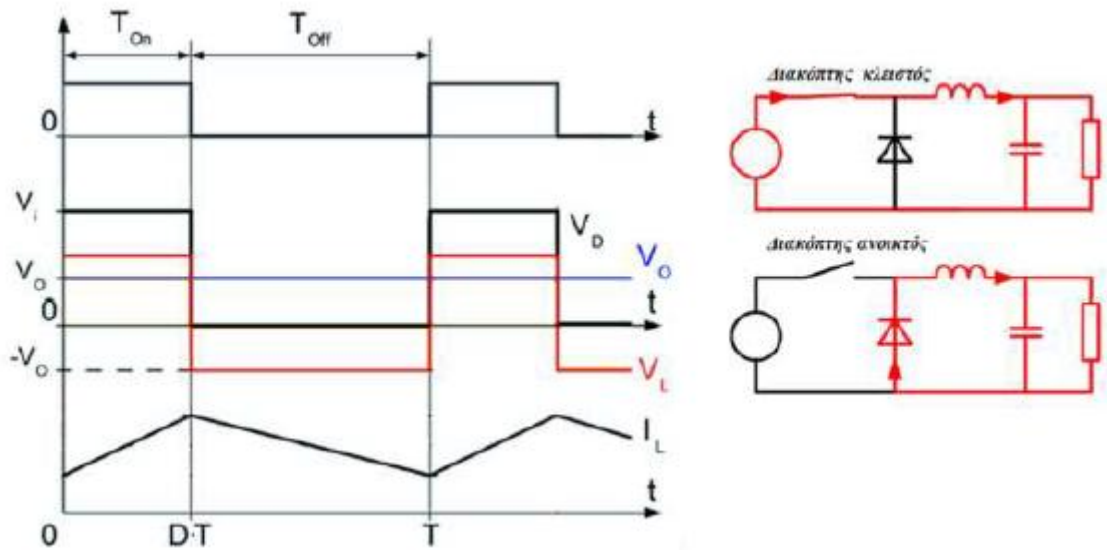
Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παρέχεται υπό τη μορφή συνεχούς τάσης και ρεύματος. Για να τροφοδοτηθεί το ηλεκτρικό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος με την ενέργεια αυτή των φωτοβολταϊκών είναι αναγκαία η διαμεσολάβηση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων, των αντιστροφών. Πρόκειται για μετατροπείς ισχύος οι οποίοι εμπεριέχουν ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου, προστασίας και φιλτραρίσματος του ρεύματος εξόδου τους. Η προσαρμογή της παραγόμενης, από τα φ/β πλαίσια, ηλεκτρικής ενέργειας στα επιθυμητά χαρακτηριστικά του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού δικτύου, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με πολλές διαφορετικές κυκλωματικές τοπολογίες μετατροπών. Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με το αν η τάση εξόδου τους είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου τους.

Μετατροπέας συνεχούς τάσης (DC/DC converter)

Για να σταθεροποιηθεί η τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας και να καταστεί κατάλληλη για την είσοδο της στον αντιστροφέα χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς ρεύματος. Οι μετατροπείς αυτοί χωρίζονται σε περεταίρω κατηγορίες ανάλογα με το αν η τάση εξόδου τους είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου.

- **Μετατροπέας Υποβιβασμού (Buck Converter)**





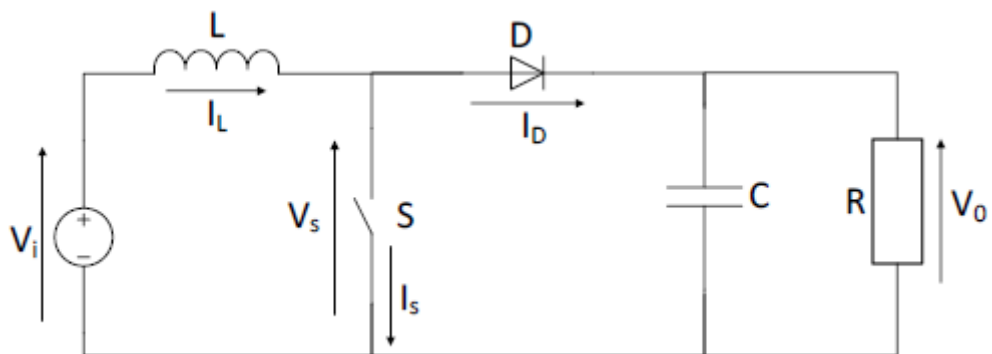
Εικόνα 2.46: Κύκλωμα και ηλεκτρικά μεγέθη μετατροπέα υποβιβασμού

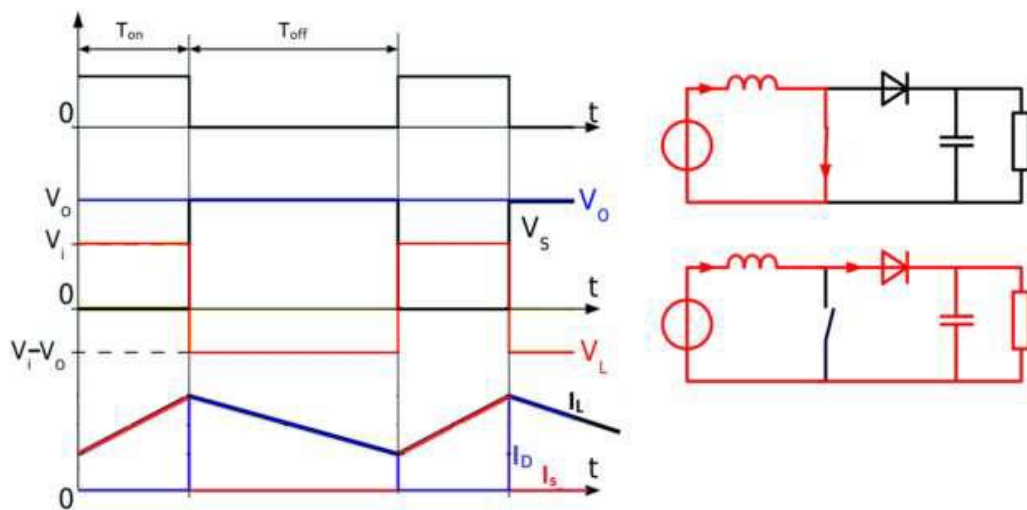
Στο σχήμα παρατηρούμε ότι όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η διόδος πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος του μετατροπέα (πηγή τάσης) παρέχει ενέργεια τόσο στο φορτίο όσο και στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης ανοίγει, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο μεταφέροντας μέρος της αποθηκευμένης του ενέργειας προς αυτό. Αποδεικνύεται ότι η μέση τιμή της τάσης εισόδου σε σχέση με αυτή της εισόδου δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{V_0}{V_1} = D \text{ όπου } D = \frac{T_{on}}{T} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

Όπου T_{on} η διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης άγει για μια περίοδο και T_{off} η διάρκεια κατά την οποία δεν άγει και T η περίοδος λειτουργίας του διακόπτη.

- Μετατροπέας Ανύψωσης (Step- Up Converter ή Boost Converter)





Εικόνα 2.47: Κύκλωμα και ηλεκτρικά μεγέθη μετατροπέα ανύψωσης

Το κύκλωμα ενός μετατροπέα ανύψωσης φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, όπου παρατηρείται ότι όταν ο διακόπτης είναι κλειστός το ρεύμα στο πηνίο αυξάνεται και αποθηκεύεται ενέργεια σε αυτό, ενώ η διόδος είναι σε κατάσταση αποκοπής, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σύνδεση μεταξύ εισόδου και εξόδου. Όταν ο διακόπτης ανοίγει το ρεύμα περνάει μέσω της διόδου και φτάνει στην έξοδο η οποία σε αυτήν την περίπτωση δέχεται ενέργεια τόσο από την πηγή όσο και από το πηνίο.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου σε σχέση με αυτή της εισόδου δίνεται από την εξίσωση:

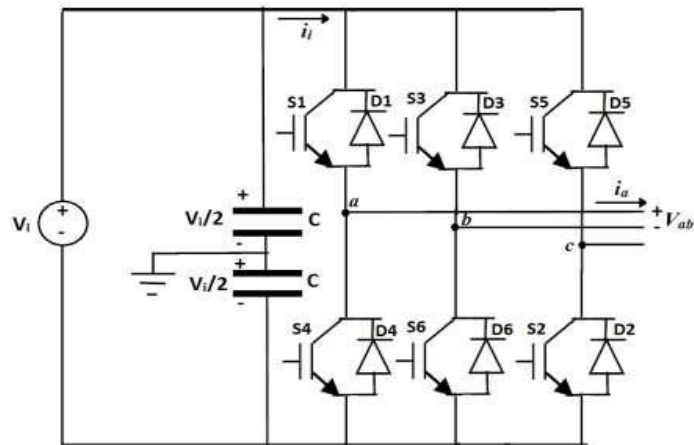
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (2.51) \quad \text{όπου } D = \frac{T_{on}}{T} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.52)$$

Όπου T_{on} η διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης άγει για μια περίοδο και T_{off} η διάρκεια κατά την οποία δεν άγει και T η περίοδος λειτουργίας του διακόπτη.

• Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης

Οι αντιστροφείς είναι διατάξεις, που όπως προαναφέρθηκε, μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Οι τριφασικοί αντιστροφείς αποτελούν γενίκευση των μονοφασικών. Όταν η είσοδος τους είναι μια πηγή τάσης τότε ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης. Οι αντιστροφείς πηγής τάσης έχουν μια χωρητικότητα παράλληλα συνδεδεμένη με την πηγή για τη σταθεροποίηση της τάσης. Σε εφαρμογές μέσης και υψηλής ισχύος

χρησιμοποιούνται οι τριφασικοί αντιστροφείς. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τοπολογία ενός τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.



Εικόνα 2.48: Κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα

A/A	Καταστάσεις Διακοπτικών Στοιχείων		V_a	V_b	V_{ab}
1	S_1, S_2, S_6 ON	S_4, S_5, S_3 OFF	$v_i/2$	$-v_i/2$	v
2	S_2, S_3, S_1 ON	S_5, S_6, S_4 OFF	$v_i/2$	$v_i/2$	0
3	S_3, S_4, S_2 ON	S_6, S_1, S_5 OFF	$-v_i/2$	$v_i/2$	$-v$
4	S_4, S_5, S_3 ON	S_1, S_2, S_6 OFF	$-v_i/2$	$v_i/2$	$-v$
5	S_5, S_6, S_4 ON	S_2, S_3, S_1 OFF	$-v_i/2$	$-v_i/2$	0
6	S_6, S_1, S_5 ON	S_3, S_4, S_2 OFF	$v_i/2$	$-v_i/2$	v
7	S_1, S_3, S_5 ON	S_4, S_6, S_2 OFF	$v_i/2$	$v_i/2$	0
8	S_4, S_6, S_2 ON	S_1, S_3, S_5 OFF	$-v_i/2$	$-v_i/2$	0

Εικόνα 2.49: Καταστάσεις λειτουργίας των διακοπών του τριφασικού αντιστροφέα

Στον πίνακα αυτό αναγράφονται οι επιτρεπόμενοι συνδυασμοί των καταστάσεων των διακοπών. Συγκεκριμένα υπάρχουν οκτώ επιτρεπόμενες διακοπτικές καταστάσεις όπου οι διακόπτες του ίδιου κλάδου δεν μπορούν να είναι ταυτόχρονα κλειστοί γιατί τότε δημιουργείται βραχυκύκλωμα στην πλευρά DC. Δύο εκ των καταστάσεων λειτουργίας των διακοπών στοιχείων οδηγούν σε μηδενισμό της τάσης στην πλευρά AC.

Οι διακόπτες ελέγχονται από παλμούς έναυσης και σβέσης. Για τη δημιουργία αυτών των παλμών συνήθως χρησιμοποιείται η τεχνική της συνημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους των παλμών, γνωστή ως SPWM. Για τον τριφασικό αντιστροφέα, στην τεχνική SPWM χρησιμοποιούνται τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς με διαφορά φάσης 120° και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Η αρχή παραγωγής των παλμών έναυσης δίνεται στο επόμενο σχήμα και στηρίζεται στη σύγκριση των κυματομορφών αναφοράς με την

τριγωνική κυματομορφή φορέα. Το πλάτος των κυματομορφών αναφοράς είναι μεταβλητό σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής του φορέα το οποίο παραμένει σταθερό.

Ως συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f ορίζεται ο λόγος της φέρουσας συχνότητας προς τη συχνότητα διαμόρφωσης:

$$m_f = \frac{f_{\Delta}}{f_c} \quad (2.53)$$

Ως συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους m_a ορίζεται ο λόγος του πλάτους του σήματος ελέγχου προς το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής:

$$m_a = \frac{V_c}{V_{\Delta}} \quad (2.54)$$

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι κυματομορφές ενός ιδανικού τριφασικού αντιστροφέα. Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας επιλέγεται να είναι περιττό πολλαπλάσιο του 3. Αποδεικνύεται ότι αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι φασικές τάσεις να μην περιέχουν άρτιες αρμονικές και επιπλέον οι αρμονικές σε συχνότητες πολλαπλάσιες του $3f_c$, κάθε φάσης, να είναι ίδιες τόσο σε πλάτος όσο και σε φάση. Συνεπώς, οι πολικές τάσεις δεν θα περιέχουν αρμονικές σε συχνότητες πολλαπλάσιες του $3f_c$.

Στη γραμμική περιοχή διαμόρφωσης ($m_a < 1$), το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι:

$$V_{ab,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} m_a V_i \quad (2.55)$$

Στο σχήμα φαίνεται επίσης και το φάσμα των αρμονικών της τάσεως εξόδου του αντιστροφέα.

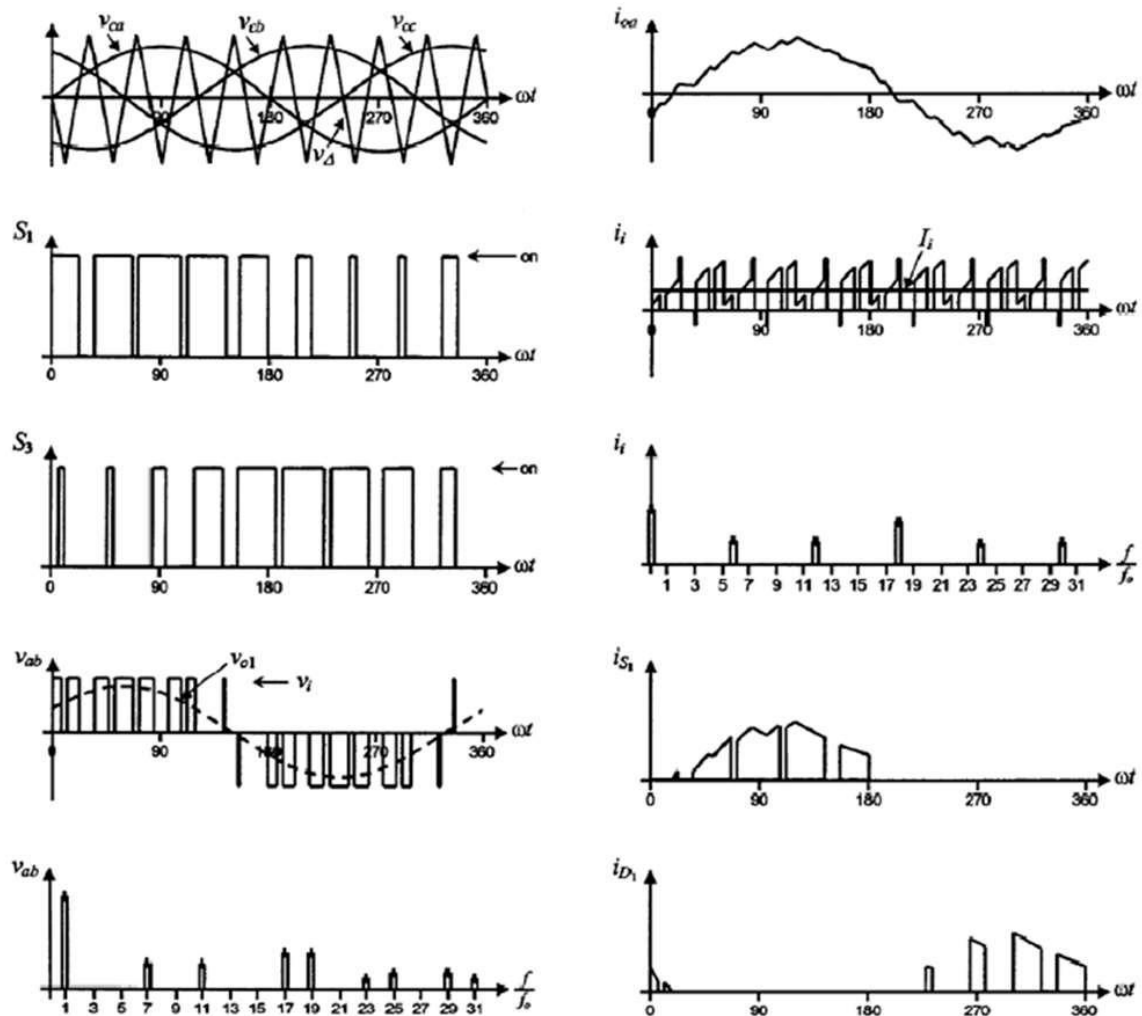
Όσο αυξάνεται η διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα:

- οι παραγόμενες αρμονικές μετατοπίζονται σε υψηλότερες συχνότητες και χρειάζονται συνεπώς μικρότερα φίλτρα για να αποκοπούν.
- ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος εξόδου, THDI, μικραίνει.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.56)$$

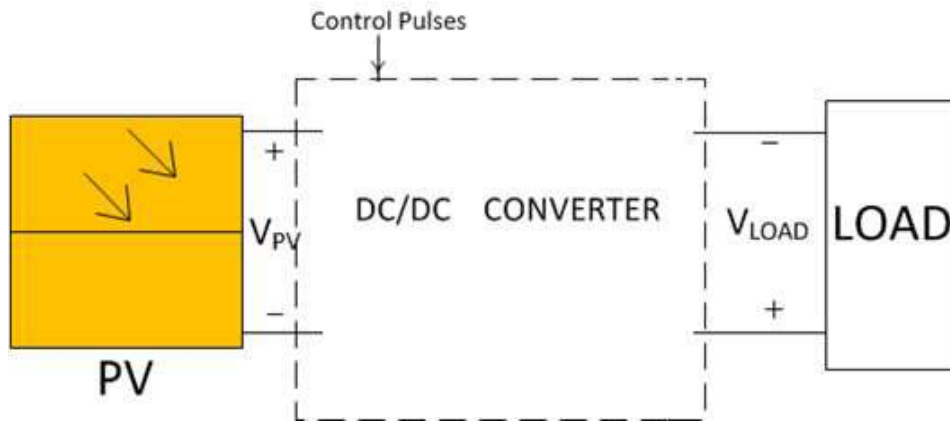
Όπου, I_1 είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος στη θεμελιώδη συχνότητα και I_h η ενεργός τιμή της αρμονικής ρεύματος τάξης h και συχνότητας $50 \times h$ Hz.

- Οι απώλειες όμως που οφείλονται στη διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα αυξάνονται.



Εικόνα 2.50: Κυματομορφές ιδανικού τριφασικού αντιστροφέα και το φάσμα των αρμονικών της τάσεως εξόδου του αντιστροφέα.

Για την παρακολούθηση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας υπάρχει ο **αλγόριθμος MPPT (Maximum Power Point Tracking)**



Εικόνα 2.51: Φωτοβολταϊκό σύστημα που τροφοδοτεί μεταβλητό φορτίο

Έστω ότι έχουμε την απλή περίπτωση τροφοδοσίας μεταβαλλόμενου φορτίου συνεχούς ρεύματος από φ/β σύστημα με μετατροπέα συνεχούς ρεύματος όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Σε ένα buck-boost μετατροπέα συνεχούς ρεύματος η μέση τιμή της τάσης εξόδου εξαρτάται από το ποσοστό του χρόνου, D , που ο ηλεκτρονικός διακόπτης είναι κλειστός.

$$V_{LOAD} = \frac{D}{1-D} V_{PV} \quad (2.58) \quad \text{όπου} \quad D = \frac{T_{on}}{T} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.52)$$

Εάν υποτεθεί ότι η τάση του φορτίου στο σχήμα είναι σταθερή τότε είναι προφανές ότι μεταβάλλοντας κατάλληλα το D αυξάνεται ή μειώνεται η τάση στην πλευρά του Φ/Β ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία ώστε το φ/β σύστημα να λειτουργεί με τη μέγιστη ισχύ ενώ στη έξοδο του μετατροπέα να παρέχεται η ονομαστική τάση του φορτίου.

Απλοποιημένος αλγόριθμος MPPT

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο ελέγχου η τάση αυξάνεται όσο ισχύει η συνθήκη:

$$dP/dV > 0$$

που συνεπάγεται και ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται, ενώ όταν ο ρυθμός μεταβολής είναι πολύ κοντά στο μηδέν η τάση σταθεροποιείται. Ο αλγόριθμος συνοψίζεται στον ακόλουθο ψευδοκώδικα.

if $(V_{PV} - V_{PV,PREVIOUS}) * (P_{PV} - P_{PV,PREVIOUS}) > 0$

then

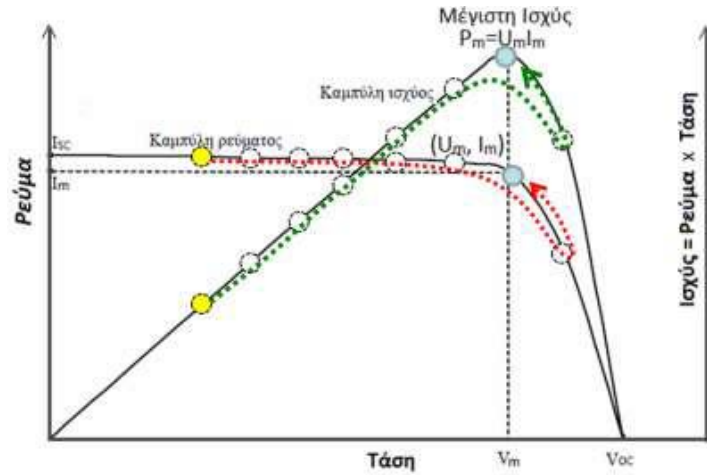
$$V_{PV,NEXT} = V_{PV} + \Delta V_p \quad (\Delta V_p, \text{ η αύξηση της τάσης του } \phi/\beta)$$

else

$$V_{PV,NEXT} = V_{PV} - \Delta V_n \quad (\Delta V_n, \text{ μείωση της τάσης του } \phi/\beta)$$

End

Η σχηματική αναπαράσταση του απλοποιημένου αλγορίθμου MPPT δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.52: Σχηματική αναπαράσταση αλγορίθμου MPPT

Αλγόριθμος MPPT με χρήση της δυναμικής αντίστασης των ϕ/β πλαισίων

Ανά πάσα στιγμή η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι:

$$P = V \cdot I \quad (2.58)$$

Εάν λόγω μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας αλλάξει η παραγόμενη ισχύς τότε θα υπάρξει μεταβολή της τάσης και μεταβολή της έντασης κατά dV και dI , αντίστοιχα. Η ισχύς στο καινούργιο σημείο λειτουργίας θα είναι:

$$P' = (V + dV) \cdot (I + dI) = V \cdot I + V \cdot dI + I \cdot dV \quad (2.59)$$

Συνεπώς, η μεταβολή στην ισχύ θα είναι:

$$dP = P' - P = V \cdot dI + I \cdot dV \quad (2.60)$$

Στο σημείο λειτουργίας με μέγιστη ισχύ η κλίση της καμπύλης ισχύος-τάσης μηδενίζεται. Δηλαδή θα ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow V \frac{dI}{dV} + I = 0 \Rightarrow \frac{dV}{dI} = - \frac{V}{I} \quad (2.61)$$

Σύμφωνα με την εξεταζόμενη μέθοδο εισάγεται περιοδικά μία διαταραχή ρεύματος στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής Z_d και η στατική αντίσταση Z_s . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση που αντιστοιχεί στο σημείο λειτουργίας με μέγιστη ισχύ.

2.3 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

Τα υδροηλεκτρικά συστήματα εκμεταλλεύονται την αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια μιας μάζας νερού που βρίσκεται σε κάποιο ύψος με σκοπό να παράγουν ηλεκτρισμό. Η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο μέσω της περρωτής του στροβίλου έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας επιτυγχάνουμε τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Η δέσμευση – αποθήκευση ποσοτήτων ύδατος σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες για ένα Υδροηλεκτρικό Σταθμό, ισοδυναμεί πρακτικά με αποταμίευση Υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η προγραμματισμένη αποδέσμευση αυτών των ποσοτήτων ύδατος και η εκτόνωση τους στους υδροστροβίλους οδηγεί στην ελεγχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με δεδομένη την ύπαρξη κατάλληλων υδάτινων πόρων και τον επαρκή εφοδιασμό τους με τις απαραίτητες βροχοπτώσεις η Υδροηλεκτρική ενέργεια καθίσταται μια σημαντικότερη εναλλακτική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Η κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου αρχίζει από την επιλογή της κατάλληλης θέσης, η οποία είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων όπως υδρολογικές, μορφολογικές, γεωλογικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές παράμετροι οι οποίες είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη. Αρχικά καταγράφεται το υδροδυναμικό της επιλεγμένης λεκάνης απορροής. Οι μετρήσεις γίνονται επί τόπου και διαρκούν πολλά χρόνια ώστε να διαπιστωθεί το ενεργειακό ενδιαφέρον της περιοχής. Η μορφολογία της κοιλάδας θα καθορίσει και τον τύπο του φράγματος που θα κατασκευαστεί. Το σημαντικότερο ρόλο στον σχεδιασμό του έργου παίζουν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής καθώς θα πρέπει να είναι εξασφαλισμένη η στεγανότητα του ταμιευτήρα και η ασφαλής θεμελίωση και στεγανότητα στη ζώνη του φράγματος.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των υδροηλεκτρικών συστημάτων αφορούν στην αυξημένη δυνατότητα ελέγχου της παραγωγής ενέργειας, χαρακτηριστικό το οποίο είναι πολύ σημαντικό για τη διαχείριση της ζήτησης αιχμής, και στη δυνατότητα αξιοποίησης μικρών πηγών για την εξυπηρέτηση αναγκών τοπικού χαρακτήρα. Κάποια μειονεκτήματα που συνήθως συνδέονται με τα υδροηλεκτρικά συστήματα είναι τα υψηλά κόστη επένδυσης, γεγονός που έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των μικρών υδροηλεκτρικών, καθώς και η δυσκολία εύρεσης διαθέσιμης τοποθεσίας και θέματα περιβαλλοντικής προστασίας.

Αντίθετα με άλλες τεχνολογίες που εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες όπως η ταχύτητα του ανέμου ή η ακτινοβολία του ήλιου σε μία περιοχή, η ροή ενός μικρού ποταμού είναι σχετικά σταθερή, προσδίδοντας έτσι πιο εύκολη πρόβλεψη και μεγαλύτερη αξιοπιστία στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα τα μικρά υδροηλεκτρικά έχουν χαρακτηριστεί ως τα πιο προβλέψιμα από όλα τα συστήματα παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.

2.3.1 Κύρια μέρη ενός υδροηλεκτρικού σταθμού

Ένας τυπικός υδροηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη και συνοδευτικά έργα:

- **Ταμιευτήρας:** Αποτέλεσμα της κατασκευής του φράγματος είναι ο σχηματισμός του ταμιευτήρα, δηλαδή μια τεχνητή λίμνη, η οποία με τον όγκο νερού που αποταμιεύει, τροφοδοτεί τους υδροστρόβιλους. Η χωρητικότητα του ταμιευτήρα αποτελεί βασικό στοιχείο για την υδροηλεκτρική αξιοποίηση της φυσικής απορροής. Κύριο χαρακτηριστικό ενός ταμιευτήρα αποτελεί η καμπύλη στάθμης – χωρητικότητας. Η μέγιστη στάθμη καθορίζεται από τη στάθμη του εκχειλιστή του φράγματος. Σε κάθε ταμιευτήρα καθορίζεται και μία ελάχιστη στάθμη λειτουργίας η οποία σχετίζεται με τις συνθήκες της υδροληψίας και τη μη εισχώρηση αέρα ή φερτών υλικών στον αγωγό προσαγωγής. Η χωρητικότητα που αντιστοιχεί μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης στάθμης λειτουργίας ονομάζεται ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Ο όγκος του νερού που αντιστοιχεί στην ελάχιστη στάθμη λειτουργίας χαρακτηρίζεται ως νεκρός όγκος. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του σταθμού παραγωγής και της ωφέλιμης χωρητικότητας του ταμιευτήρα έχουμε λίμνες ημερήσιας, εβδομαδιαίας, μηνιαίας, ετήσιας ή υπερετήσιας ρυθμιστικής ικανότητας. Ένας ταμιευτήρας ετήσιας ρύθμισης χαρακτηρίζεται από μεγάλη χωρητικότητα και μεγάλο εύρος διακύμανσης στάθμης. Χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό για ανάσχεση πλημμυρών και για ρύθμιση των φυσικών παροχών. Αντίθετα, ένας εβδομαδιαίος ταμιευτήρας έχει μικρή χωρητικότητα και μικρό εύρος διακύμανσης στάθμης. Τέλος, οι ταμιευτήρες ημερήσιας ρύθμισης έχουν δυνατότητα αποθήκευσης νερού μέχρι 24 ώρες και ικανοποιούν ανάγκες άρδευσης, ύδρευσης και οικολογικών παροχών.
- **Φράγμα – Υπερχειλιστής:** Το φράγμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι απαραίτητο για τη δημιουργία της τεχνητής λίμνης. Μπορεί να είναι κατασκευασμένο από μπετόν, χωμάτινο ή λιθόριπτο. Ο υπερχειλιστής είναι ένα έργο απαραίτητο για την ασφάλεια του φράγματος και εξασφαλίζει την εκφόρτιση του πλημμυρικού νερού.



Εικόνα 2.53: Υδροηλεκτρικό φράγμα Πλατανόβρυσης

- **Υδροληψία – Θύρα Υδροληψίας:** Με τον όρο υδροληψία εννοείται η είσοδος του νερού στη σήραγγα προσαγωγής. Στην είσοδο της υδροληψίας βρίσκεται το σύστημα της σχάρας, το οποίο συγκρατεί τις φερτές ύλες και άλλα στερεά σώματα που θα μπορούσαν να εισέλθουν στη σήραγγα προσαγωγής και στη συνέχεια να φτάσουν στο στρόβιλο προξενώντας σοβαρές ζημιές. Συνήθως στην υδροληψία είναι εγκατεστημένος ένας καθαριστής ο οποίος απαλλάσσει περιοδικώς το σύστημα της σχάρας από τις συσσωρευμένες ύλες. Η θύρα υδροληψίας βρίσκεται σε κάποια απόσταση από την είσοδο της σήραγγας και χρησιμεύει στο να την απομονώνει από τη λίμνη για λόγους προστασίας και για τις επιθεωρήσεις.
- **Σήραγγα Προσαγωγής – Πύργος Εκτόνωσης:** Η σήραγγα προσαγωγής (κυκλικής ή πεταλοειδούς διατομής) προσάγει το νερό υπό πίεση, από την υδροληψία μέχρι τον πύργο εκτόνωσης. Όταν απαιτείται, ο πύργος εκτόνωσης, ή ισορροπίας, αποσβένει τις υδραυλικές ταλαντώσεις που είναι δυνατό να δημιουργηθούν στους στρόβιλους. Έτσι, το υδραυλικό πλήγμα εκτονώνεται στον πύργο και μειώνονται οι πιέσεις στη σήραγγα.
- **Δικλείδα Ασφαλείας (πεταλούδα) – Αγωγός Πτώσης:** Μετά τον πύργο εκτόνωσης τοποθετείται η δικλείδα ασφαλείας – πεταλούδα, για την προστασία και επιθεώρηση του αγωγού πτώσης.

- Σταθμός Παραγωγής:** Εδώ γίνεται η μετατροπή της ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική. Τα κύρια μέρη του σταθμού είναι: α) **οι υδροστροβίλοι** όπου η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στην περιστρεφόμενη άτρακτο του υδροστροβίλου, β) **οι ηλεκτρογεννήτριες**, οι οποίες είναι απ' ευθείας συνδεδεμένες στην άτρακτο κάθε υδροστροβίλου και μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική και γ) **οι μετασχηματιστές**, σκοπός της λειτουργίας των οποίων είναι η ανύψωση της τάσης του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στην υψηλή τάση του διασυνδεδεμένου δικτύου ώστε να ελαττώνονται οι απώλειες από τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι υδροστροβίλων:
 - **οι υδροστροβίλοι δράσεως** (γνωστοί ως τύπου Pelton) οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές και ενώ δεν έχουν τόσο καλή απόδοση στο πλήρες φορτίο, στα μικρά φορτία η απόδοσή τους είναι καλύτερη από την αντίστοιχη των Francis.
 - **οι αντιδράσεως** (τύπου Francis) χρησιμοποιούνται για υψομετρικές διαφορές από 100 μέχρι 300 μέτρα περίπου και η απόδοσή τους είναι υψηλή στο πλήρες φορτίο αλλά πέφτει σε μικρότερα φορτία.
 - **Οι υδροστροβίλοι προώσεως** (Kaplan) οι οποίοι υπάγονται στους υδροστροβίλους αντιδράσεως και χρησιμοποιούνται σε όσο το δυνατόν μικρότερα ύψη.
- Υποσταθμός Ζεύξης:** Ο υποσταθμός ζεύξης είναι συνήθως 150 kV και συνδέει τον σταθμό παραγωγής του με τους υποσταθμούς υπερυψηλής (400 kV) τάσης. Αυτοί με τη σειρά τους συνδέονται όλοι μεταξύ τους, αποτελώντας έτσι το Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Παραγωγής και Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- Εκκενωτής Πυθμένα:** Πρόκειται για μια σήραγγα η οποία κατασκευάζεται με σκοπό την ταχεία εκκένωση ενός ταμιευτήρα σε περίπτωση σοβαρής αστοχίας του φράγματος.

Λειτουργία υδροηλεκτρικού σταθμού (με φράγμα)



Εικόνα 2.54: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ΥΗΣ με φράγμα

2.3.2 Τύποι υδροηλεκτρικών σταθμών

Το μέγεθος των υδροηλεκτρικών σταθμών μπορεί να εκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα, από λίγα Watt έως πολλά Gigawatt εγκατεστημένης ισχύος.

Υδροηλεκτρικοί σταθμοί μεγάλης κλίμακας

Τα συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας έχουν εγκατασταθεί σε όλο τον κόσμο, με το μεγαλύτερο να έχει δυναμικότητα 10.000 MW (10 GW). Κάθε ένα από αυτά τα συστήματα μεγάλης κλίμακας απαιτεί ένα πολύ μεγάλο φράγμα, ή μια σειρά φραγμάτων, για να αποθηκεύσει τις τεράστιες ποσότητες νερού που απαιτούνται από το σύστημα. Το φράγμα Kariba στη Ζάμπια της Αφρικής συγκρατεί 160 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα νερό, και παράγει 1.300 MW ηλεκτρικό ρεύμα. Ενώ η παραγωγή ενέργειας από το νερό έχει τα οφέλη της, από την άποψη των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, έχει επίσης σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής ενέργειας έχουν μια καταστρεπτική επίδραση στις ροές των ποταμών και στις παροχές νερού. Για την κατασκευή μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικών έργων χρειάζεται συνήθως να πλημμυρίσουν μεγάλες εκτάσεις εδάφους, οδηγώντας στη μετατόπιση των ανθρώπων που ζουν στην περιοχή, και στις αρνητικές επιδράσεις στην τοπική πανίδα και χλωρίδα. Τα προτεινόμενα σχέδια παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζουν συχνά την έντονη αντίδραση από ομάδες ανθρώπων σχετικές με το περιβάλλον και τα ανθρώπινα δικαιώματα καθώς προβληματίζονται για τις κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιδράσεις αυτών των αναπτυξιακών προγραμμάτων

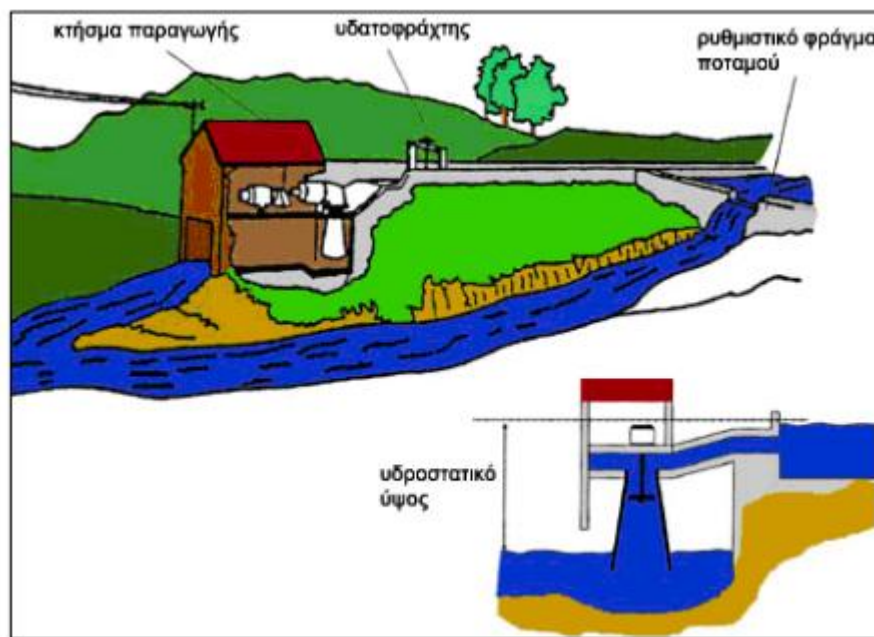
Υδροηλεκτρικοί σταθμοί μικρής κλίμακας

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι διαθέσιμη από μερικές εκατοντάδες Watt μέχρι και 10GW. Στο χαμηλό σημείο αυτού του φάσματος, η υδροηλεκτρική ενέργεια μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κατηγορίες.

- Μικρο-υδροηλεκτρικά με μικρότερη ισχύ από 100kW
- Μίνι-υδροηλεκτρικά με ισχύ από 100kW ως 1MW
- Μικρά υδροηλεκτρικά με ισχύ από 1 MW έως 10 MW

Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά συστήματα λειτουργούν με την καθοδήγηση μέρους της ροής κάποιου ποταμού στον ρυθμιστή ροής και στον υδροστρόβιλο, ο οποίος κινεί μια γεννήτρια και παραγάγει την ηλεκτρική ενέργεια όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Το νερό ρέει έπειτα πίσω στον ποταμό. Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά

συστήματα λειτουργούν συνήθως παράλληλα στη ροή του ποταμού, και έτσι δεν διακόπτεται η ροή του. Αυτό είναι προτιμότερο από περιβαλλοντική άποψη, καθώς οι εποχιακές αυξομειώσεις νερού δεν επηρεάζουν την ροή του ποταμού στην κατεύθυνση του ρεύματος, ενώ δεν πλημμυρίζουν κοιλάδες σε υψηλότερα από το σύστημα επίπεδα. Μια περαιτέρω επίπτωση είναι ότι η παραγωγή ενέργειας δεν καθορίζεται με κάποιο έλεγχο της ροής του ποταμού, αλλά αντίθετα ο στρόβιλος λειτουργεί όταν υπάρχει κάποια ροή και σε παραγωγή ενέργειας εξαρτάται αποκλειστικά από αυτή. Αυτό σημαίνει ότι το μηχανικό σύστημα ρύθμισης της ροής του νερού δεν απαιτείται με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος και οι απαιτήσεις συντήρησης. Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά συστήματα είναι ιδιαίτερα κατάλληλα ως μακρινές παροχές ηλεκτρικού ρεύματος για τις αγροτικές και απομονωμένες κοινότητες, ως οικονομική εναλλακτική λύση στην επέκταση ή αναβάθμιση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα παρέχουν μια πηγή φτηνής, ανεξάρτητης και συνεχούς ενέργειας, χωρίς υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Υπολογίζεται ότι το 1990 υπήρξε παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύς μικρής υδροηλεκτρικής κλίμακας (λιγότερο από 10MW) της τάξεως των 19.5GW.



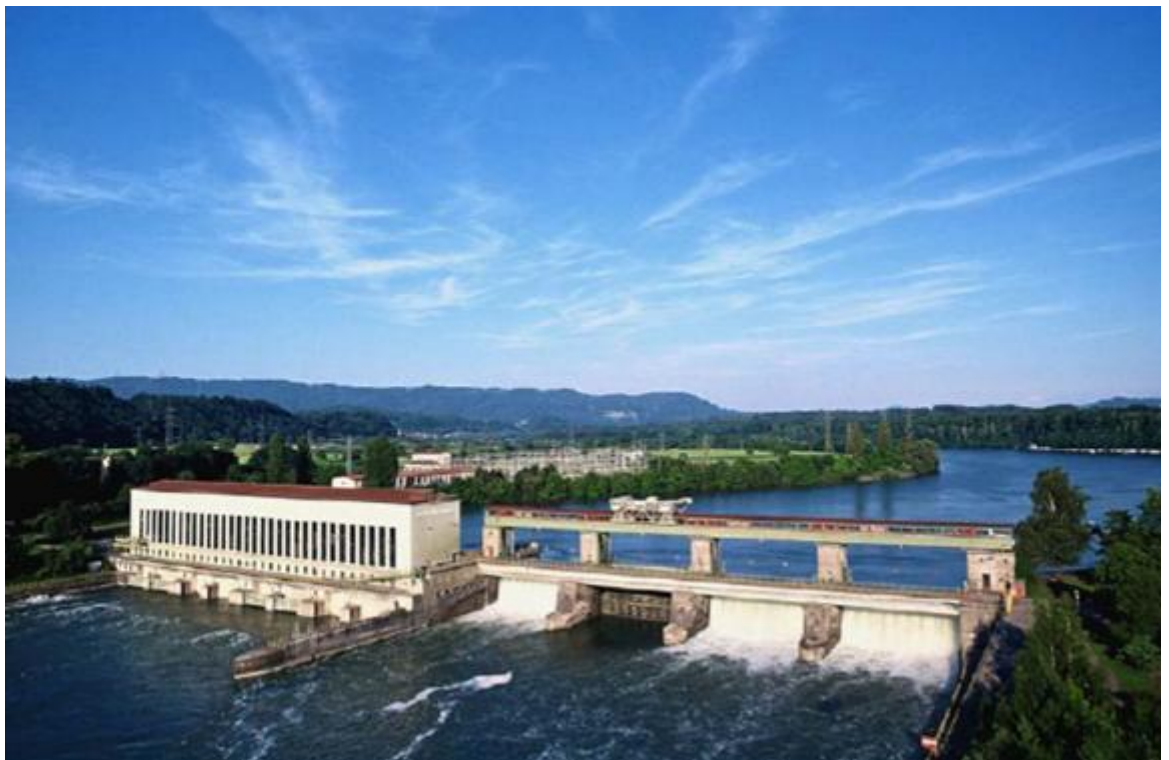
Εικόνα 2.55: Μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική εγκατάσταση

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί να είναι υπόγειος ή υπέργειος και η επιλογή αυτή βασίζεται σε οικονομοτεχνική μελέτη. Στην επιλογή αυτή σημαντικό ρόλο έχει ο υδροστρόβιλος και η μορφολογία του εδάφους. Τα τελευταία χρόνια, χάρη στα σύγχρονα

μέσα διάνοιξης σιηράγγων οι υπόγειοι ΥΗΣ προκύπτουν όλο και περισσότερο συμφέροντες.

Εκτός των παραπάνω κατηγοριοποιήσεων, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί διακρίνονται και με βάση την κατασκευαστική τους δομή σε σταθμούς φυσικής ροής, σταθμούς ρυθμιζόμενης ροής και σε υδραντλητικούς σταθμούς.

- Οι σταθμοί **φυσικής ροής** χρησιμοποιούν ως πρωτογενή μορφή ενέργειας το διερχόμενο υδάτινο ρεύμα (ροή ποταμού). Αυτοί οι σταθμοί χρησιμοποιούν λίγο, έως καθόλου, αποθηκευμένο νερό για τη ροή μέσα από τους υδροστροβίλους. Η αποθήκευση του νερού συνήθως κυμαίνεται για τη λειτουργία μιας ημέρας, ή μιας εβδομάδας και επηρεάζονται από τις αλλαγές του καιρού, ιδιαίτερα οι εποχιακές μεταβολές προκαλούν σημαντικές διακυμάνσεις στην παραγωγή ισχύος. Τέτοιοι σταθμοί κατασκευάζονται σε περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλη ροή σε ποτάμια με μικρό βάθος, σε ποτάμια με μεγάλο φορτίο ιλύος και σε περιοχές οι οποίες είναι ακατάλληλες για ανέγερση φραγμάτων.

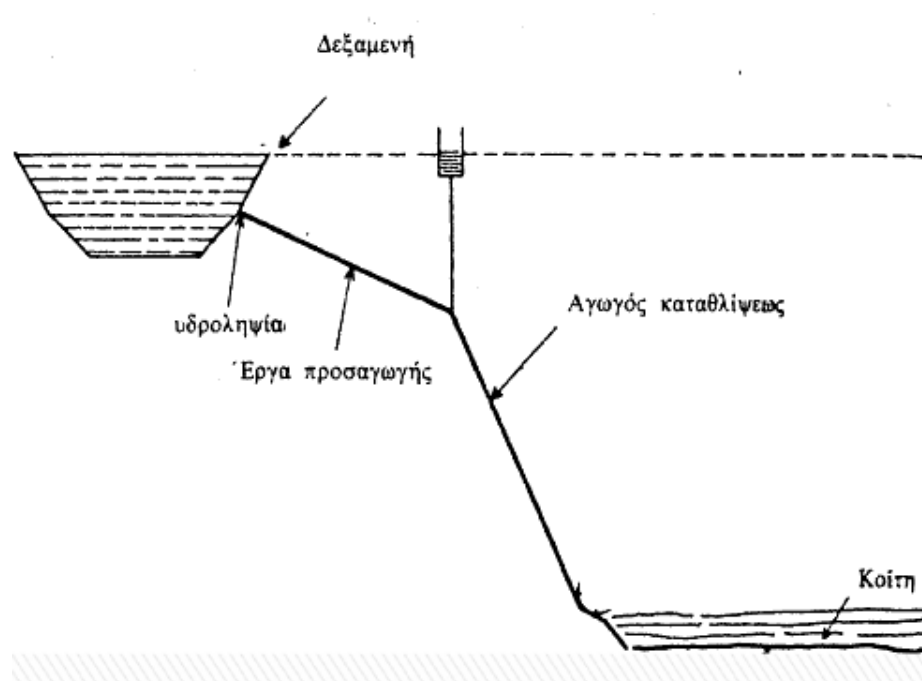


Εικόνα 2.56: run-river σταθμός παραγωγής ενέργειας - φυσικής ροής

- Οι σταθμοί **ρυθμιζόμενης ροής** χρησιμοποιούν σαν καύσιμο το νερό το οποίο συλλέγεται σε ταμιευτήρες (τεχνητές λίμνες – φράγματα) ώστε να δημιουργείται

υψομετρική διαφορά και να γίνεται εκμετάλλευση ελεγχόμενης υδατοπτώσεως. Τα φράγματα που χρησιμοποιούνται είναι είτε φράγματα σκυροδέματος είτε γαιώδη. Έχουν ικανή αποθηκευτική χωρητικότητα ώστε να ανταπεξέρχονται στις εποχιακές μεταβολές της ροής του νερού και να παρέχουν μια σταθερή παροχή ηλεκτρισμού σε όλη τη διάρκεια του έτους. Κάποια μεγάλα φράγματα έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν νερό τόσο ώστε ο σταθμός να λειτουργεί για αρκετά έτη.

- Οι **υδραντλητικοί σταθμοί** έχουν δύο φράγματα ένα σε υψηλότερη και ένα σε χαμηλότερη στάθμη από το σταθμό και αφού το νερό φύγει από το πρώτο φράγμα (το υψηλό), διέλθει από τους στροβίλους και παράγει ηλεκτρισμό, ρέει στο δεύτερο φράγμα (το χαμηλό). Κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου, όταν δηλαδή δεν υπάρχει αυξημένη ζήτηση ηλεκτρισμού, μέρος του νερού αντλείται από το χαμηλό φράγμα, με αναστροφή της λειτουργία των στροβίλων που λειτουργούν ως αντλίες, στο υψηλό φράγμα και έτσι μπορεί να επαναληφθεί ο κύκλος παραγωγής ηλεκτρισμού. Προφανώς είναι απαραίτητη η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για να αντλούν νερό από τη χαμηλότερη στην υψηλότερη δεξαμενή. Η ενέργεια αυτή λαμβάνεται από το δίκτυο το οποίο τροφοδοτείται από τους συμβατικούς θερμικούς σταθμούς. Έτσι παρατηρείται ότι σε αντίθεση με τους συμβατικούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς αποθήκευσης, οι υδραντλητικοί σταθμοί επαναχρησιμοποιούν το νερό.



Εικόνα 2.57: Σχηματική διάταξη υδροηλεκτρικής εγκατάστασης



Εικόνα 2.58: Μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός

2.3.3 Περιορισμοί λειτουργίας

Για τη λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού λαμβάνονται υπόψη κάποιοι σημαντικοί περιορισμοί.

- **Εξίσωση ισορροπίας του νερού (water balance)**

Η εξίσωση αυτή αποτελεί έναν πολύ σημαντικό περιορισμό γιατί εξασφαλίζει τη συνεχή ροή του νερού για το υδροηλεκτρικό δίκτυο.

$$V_{jt} = V_{j,t-1} - Q_{jt} - S_{jt} + I_{jt} + \sum_{k=1}^{M_j} (Q_{k,t-d_k} + S_{k,t-d_k}) \quad (2.69)$$

- **Όρια εκροής υδροηλεκτρικού σταθμού (hydroplant discharge limits)**

Η μέγιστη ισχύς εξόδου των υδροηλεκτρικών μονάδων περιορίζεται από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και εξαρτάται εν γένει από το βαθμό απόδοσης της μονάδας ο οποίος για σταθερή παροχή νερού στον υδροστροβίλο είναι συνάρτηση της υψομετρικής διαφοράς του κάτω από τον άνω ταμιευτήρα. Η σχέση αυτή περιορίζεται μεταξύ δύο επιτρεπτών τιμών τη δυνατότητα εκροής υδάτων των υδροηλεκτρικών μονάδων:

$$\overline{Q_j} \leq Q_{jt} \leq \underline{Q_j} \quad (2.70)$$

- **Ζώνες απαγορευμένης λειτουργίας**

Η εμφάνιση κραδασμών συντονισμού και ο κίνδυνος καταστροφής των περυγίων του υδροστροβίλου λόγω σπηλαίωσης καθιστούν απαγορευτική τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών σταθμών (ΥΗΣ) σε συγκεκριμένες περιοχές της ισχύος εξόδου τους.

- **Όρια λειτουργίας ταμιευτήρων (reservoir operating limits)**

Η στάθμη των ταμιευτήρων μεταβάλλεται υποχρεωτικά μέσα στα όρια που ορίζουν οι προδιαγραφές ασφαλούς και οικονομικής λειτουργίας του ΥΗΣ. Η υπερχειλίση θα πρέπει να αποφεύγεται αφού οδηγεί σε αντισυμβατική χρήση του αποθηκευμένου νερού ενώ μεγάλες και γρήγορες μεταβολές της στάθμης του αποθηκευμένου νερού σε μικρούς ταμιευτήρες είναι δυνατό να επηρεάσουν τη στατικότητα του φράγματος. Εκτός αυτού σε ορισμένους ταμιευτήρες αναπτύσσονται παραλίες λουομένων και η στάθμη θα πρέπει να διατηρείται σε σταθερά επίπεδα. Ο περιορισμός αυτός καθορίζει τη μέγιστη και τη μέγιστη και

την ελάχιστη δυνατή τιμή όγκου υδάτων που μπορούν να περιέχουν οι ταμιευτήρες των υδροηλεκτρικών μονάδων:

$$\underline{V}_j \leq V_{jt} \leq \overline{V}_j \quad (2.71)$$

- **Αρχικός και τελικός όγκος ταμιευτήρων (reservoir initial / target volume)**

Ο περιορισμός αυτός καθορίζει μια συγκεκριμένη αρχική και τελική τιμή που πρέπει να έχουν οι ταμιευτήρες των υδροηλεκτρικών μονάδων κατά την έναρξη και λήξη του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Επειδή οι διαθέσιμες ποσότητες νερού είναι περιορισμένες στο τέλος του συγκεκριμένου ορίζοντα ο ταμιευτήρας πρέπει να έχει ένα συγκεκριμένο όγκο, γεγονός που δεν επιτρέπει την αλόγιστη χρήση των υδροηλεκτρικών σταθμών, αλλά περιορίζει την χρήση του μόνο για κάλυψη των αιχμών φορτίου.

$$V_{j0} = V_{j,ini} \text{ (Αρχικός όγκος ταμιευτήρων)} \quad (2.72)$$

$$V_{jt} = V_{j,fin} \text{ (Τελικός/επιθυμητός όγκος ταμιευτήρων)} \quad (2.73)$$

- **Άρδευση**

Η σημαντικότερη χρήση των υδροηλεκτρικών σταθμών μετά τη χρήση τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η χρήση τους για την παροχή αρδευτικών νερών. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού η λειτουργία των ΥΗΣ προκαθορίζεται από τις αρδευτικές ανάγκες όταν αυτές επιβάλλονται.

Όλοι οι παραπάνω περιορισμοί συνθέτουν ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας το οποίο συμπεριλαμβάνει διακριτές μεταβλητές, όπως η κατάσταση ένταξης θερμικών σταθμών (ΘΜ), συνεχείς μεταβλητές απόφασης, όπως ο προσδιορισμός του επιπέδου εξόδου όλων των μονάδων και περιορισμούς. Οι υπολογιστικές απαιτήσεις της επίλυσης αυξάνονται με το πλήθος των μεταβλητών απόφασης και των περιορισμών και γίνονται πολύ μεγάλες για συστήματα πραγματικού μεγέθους. Επιπλέον, η ραγδαία και διαρκής εξέλιξη και εξάπλωση των ΣΗΕ συμβάλλει ακόμη περισσότερο στην αύξηση του βαθμού δυσκολίας του προβλήματος. Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν έχει αναπτυχθεί κάποια μέθοδος που να υπολογίζει τη βέλτιστη λύση του προβλήματος για συστήματα πραγματικού μεγέθους. Όλες οι μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί υπολογίζουν μια υποβέλτιστη λύση. Όμως τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από ένα όσο το δυνατόν καλύτερο πρόγραμμα βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής

συνεργασίας είναι μεγάλα και η περιοχή εξακολουθεί να συγκεντρώνει αξιόλογη ερευνητική προσπάθεια. Η μαθηματική μοντελοποίηση της υδροθερμικής συνεργασίας εξαρτάται σε πολύ σημαντικό βαθμό από την επιλογή της χρονικής περιόδου εξέτασης του προβλήματος. Σύμφωνα με τη χρονική περίοδο που επιλέγεται για να μελετηθεί το πρόβλημα διακρίνονται οι παρακάτω τρεις, βασικές κατηγορίες:

- **Βραχυπρόθεσμη υδροθερμική συνεργασία:** Το χρονικό διάστημα που επιλέγεται για τη μελέτη του προβλήματος κυμαίνεται από μία ημέρα έως μία εβδομάδα, ενώ το χρονικό βήμα που συνήθως χρησιμοποιείται είναι ωριαίο.
- **Μεσοπρόθεσμη υδροθερμική συνεργασία:** Το χρονικό διάστημα κυμαίνεται μεταξύ ενός μήνα και ενός χρόνου, ενώ το χρονικό βήμα που συνήθως χρησιμοποιείται είναι εβδομαδιαίο.
- **Μακροπρόθεσμη υδροθερμική συνεργασία:** Το χρονικό διάστημα υπερβαίνει τον χρόνο, ενώ το χρονικό βήμα που συνήθως χρησιμοποιείται είναι εβδομαδιαίο ή μηνιαίο.

3. Χαρακτηριστικά λειτουργίας ΣΗΕ

Βασικός σκοπός ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι να παρέχει στους καταναλωτές όσο το δυνατόν οικονομικότερη ηλεκτρική ενέργεια με έναν αποδεκτό βαθμό αξιοπιστίας και ποιότητας. Για να ικανοποιηθεί αυτός ο στόχος, το σύστημα θα πρέπει να παραμένει εντός ενός συνόλου λειτουργικών περιορισμών.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητο να ικανοποιούν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Ευελιξία προκειμένου να ικανοποιήσουν τις σύνθετες ανάγκες του σύγχρονου καταναλωτή.
- Να είναι προσβάσιμα σε όλους τους παραγωγούς και ειδικά τους μικρούς καθώς και στις μονάδες που βασίζονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Να είναι αξιόπιστα προσφέροντας ασφαλή και ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Να λειτουργούν αποδοτικά σε όλα τα επίπεδα.

3.1 Ισοζύγιο Ισχύος – Ελέγχου Φορτίου Συχνότητας

Το ισοζύγιο παραγόμενης ισχύος-κατανάλωσης θέτει πολλούς τεχνικούς περιορισμούς στη λειτουργία ενός ΣΗΕ. Η παραβίαση του συνεπάγεται κατάρρευση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ότι αφορά τη λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ο περιορισμός αυτός τη διαφοροποιεί από οποιαδήποτε άλλη αγορά καθώς ανά πάσα στιγμή η προσφορά ενέργειας πρέπει να ισούται με τη ζήτηση λόγω του ότι δεν υπάρχουν τρόποι οικονομικής αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Επίσης όπως προαναφέρθηκε η ηλεκτρική ενέργεια συγκεντρώνεται μαζικά για λόγους οικονομίας στο σύστημα μεταφοράς και μέσω αυτού διοχετεύεται στους καταναλωτές. Η ένα προς ένα συσχέτιση παραγωγού-καταναλωτή δεν είναι δυνατή και μία πιθανή κατάρρευση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει όλους τους συμμετέχοντες στην αγορά.

Με δεδομένες τις παραπάνω ιδιαιτερότητες είναι σαφές ότι για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος θα πρέπει να πραγματοποιείται πρόβλεψη του φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να προγραμματίζεται από πριν η λειτουργία του. Η εκτίμηση των ροών ηλεκτρικής ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς γίνεται με τις μελέτες ροών φορτίου μέσω των οποίων διαπιστώνονται πιθανές υπερφορτίσεις και γίνεται επίσης εκτίμηση της ασφάλειας λειτουργίας.

Η πρόβλεψη της ζήτησης καθώς επίσης και της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικές διεργασίες για την ασφάλεια και οικονομική λειτουργία του συστήματος. Κατά την πρόβλεψη του φορτίου λαμβάνονται υπόψη διάφορα είδη κυκλικότητας της συμπεριφοράς του (εβδομαδιαίος κύκλος) καθώς και εξάρτησης του από μετεωρολογικούς παράγοντες π.χ. θερμοκρασία κ.τ.λ. Υπάρχουν διάφορα είδη πρόβλεψης φορτίου, ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα εφαρμογής, που εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς.

3.2 Τεχνικοί περιορισμοί Θερμοηλεκτρικών Σταθμών

Η εκκίνηση των θερμοηλεκτρικών σταθμών αποτελεί μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία έως ότου συγχρονιστούν με το δίκτυο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα υπολογίσιμο κόστος που θα πρέπει να προστεθεί στο κόστος λειτουργίας τους. Το κόστος εκκίνησης εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, το καύσιμο που χρησιμοποιεί και το χρόνο κράτησης της μονάδας, δηλαδή το χρόνο παραμονής της εκτός λειτουργίας. Η εκκίνηση τους χαρακτηρίζεται ως “ψυχρή εκκίνηση” όταν έχει προϋπάρξει μεγάλος χρόνος κράτησης και ως “θερμή εκκίνηση” όταν προϋπάρξει μικρός χρόνος κράτησης. Εν γένει, το κόστος εκκίνησης αυξάνεται όσο αυξάνεται η διάρκεια κράτησης της μονάδας και έχει ως μέγιστη τιμή κορεσμού το κόστος ψυχρής εκκίνησης. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι χρόνοι θερμής και ψυχρής εκκίνησης μιας λιγνιτικής μονάδας 300 MW.

Εκκίνηση	Χρόνος κράτησης μονάδας(h)	Ενδεικτικός χρόνος εκκίνησης(h)
Ψυχρή	>48	10
	24 έως 40	4.5
Θερμή	6 έως 8	3.5
	1 έως 2	2

Εικόνα 3.1: Πίνακας χρόνων θερμής και ψυχρής εκκίνησης

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που περιορίζουν την ταχύτητα εκκίνησης και φόρτισης θερμικών μονάδων είναι οι εξής:

- **Η θερμική τάση που αναπτύσσεται σε μέταλλα.** Σε κάθε εκκίνηση μια θερμικής μονάδας από ψυχρή ή και από θερμή κατάσταση, όπως επίσης και σε κάθε μεταβολή του φορτίου της δημιουργούνται θερμοκρασιακές μεταβολές που είναι αισθητές στις επιφάνειες με τις οποίες έρχεται σε επαφή ο ατμός. Όταν θερμαίνεται ένα τοίχωμα, αυξάνεται η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας αλλά η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας παραμένει χαμηλή έτσι το υλικό της θερμαινόμενης επιφάνειας διαστέλλεται. Η διαστολή όμως εμποδίζεται από το ενδότερο υλικό του τοιχώματος που είναι ακόμα ψυχρότερο, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια θερμική τάση θλίψεως. Ανάλογα με τις συνθήκες εκκίνησης και φόρτισης της μονάδας ενδέχεται να εμφανιστούν μεγάλες διαφορές στις

θερμοκρασίες των κελυφών και αυτό έχει ως άμεση συνέπεια τη δημιουργία επικίνδυνων θερμικών τάσεων, οι οποίες είναι μεγαλύτερες του ορίου ελαστικότητας του υλικού, οπότε δημιουργείται ορισμένη μόνιμη παραμόρφωση, αλλοίωση και γήρανση.

- **Η παραμόρφωση των μετάλλων των οριζόντιων αρμών των κελυφών** οι οποίες οφείλονται στις διαφορές των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών επιφανειών τους.
- **Οι ταλαντώσεις του ατμοστροβίλου κατά την εκκίνηση του.** Για να αποφεύγονται κατά την εκκίνηση οι ταλαντώσεις, η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του στροφείου, γίνεται με ορισμένο ρυθμό. Έτσι παραμένει για λίγο σε ορισμένες τιμές ταχύτητας (π.χ. 500 και 1000 rpm) ώστε να επιτευχθεί η ομοιόμορφη θέρμανση του ατμοστροβίλου.

3.3 Οικονομική Λειτουργία ΣΗΕ

Η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι σταθερή αλλά παρουσιάζει ημερήσιες μεταβολές. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης κάποιες μονάδες παραγωγής δεν χρειάζεται να λειτουργούν γιατί κάτι τέτοιο δεν θα ήταν συμφέρον οικονομικά. Έτσι για την εξασφάλιση της οικονομικής λειτουργίας του ΣΗΕ, η μεταβολή του φορτίου συνεπάγεται τη μεταβολή του αριθμού των μονάδων που παρέχουν ισχύ στο δίκτυο. Είναι λοιπόν απαραίτητη η ύπαρξη ενός προγράμματος ένταξης / κράτησης των μονάδων παραγωγής για το χρονικό διάστημα που εξετάζεται κάθε φορά, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους.

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με θερμοηλεκτρικές μονάδες για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ένταξης μονάδων (Unit Commitment) τα βασικά δεδομένα εισόδου είναι:

- το φορτίο του συστήματος για μια δεδομένη χρονική περίοδο, T ωρών,
- τα τεχνικά χαρακτηριστικά των N_g διαθέσιμων μονάδων παραγωγής και
- τυχόν λειτουργικοί περιορισμοί.

Κατά την επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων, υπολογίζεται και μια πρόβλεψη της βέλτιστης ωριαίας εξόδου των θερμικών μονάδων. Η διάρκεια της χρονικής περιόδου προγραμματισμού είναι συνήθως $T=24$ h (ένταξη μονάδων για την επόμενη μέρα) ή $T=168$ h (εβδομαδιαία ένταξη μονάδων). Επειδή λοιπόν η κατάρτιση του προγράμματος ένταξης μονάδων για την επόμενη μέρα βασίζεται στην πρόβλεψη του φορτίου του συστήματος, τυχόν σφάλματα στην πρόβλεψη φορτίου μπορεί να οδηγήσουν σ' ένα μη οικονομικά βέλτιστο πρόγραμμα.

Οι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται κατά την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων είναι οι ακόλουθοι:

- Πρέπει πάντα να υπάρχει **στρεφόμενη εφεδρεία** στο σύστημα ώστε η απώλεια μιας μονάδας να μην προκαλέσει μεγάλη πτώση στη συχνότητα και οι υπόλοιπες μονάδες να μπορέσουν να αναπληρώσουν το έλλειμμα παραγωγής. Η στρεφόμενη εφεδρεία (Spinning Reserve) του συστήματος σε μια χρονική στιγμή υπολογίζεται αν αφαιρέσουμε από τη συνολική διαθέσιμη ισχύ των συγχρονισμένων στο δίκτυο (στρεφόμενων) μονάδων, το φορτίο μαζί με τις απώλειες μεταφοράς που ικανοποιείται τη δεδομένη στιγμή. Συνήθως η στρεφόμενη εφεδρεία απαιτείται να είναι μεγαλύτερη από κάποιο ποσοστό (για παράδειγμα 10%) της προβλεπόμενης

αιχμής φορτίου ή να είναι αρκετή για να καλύψει την απώλεια της μεγαλύτερης μονάδας του δικτύου. Εκτός όμως από τη στρεφόμενη εφεδρεία υπάρχει και η **ψυχρή εφεδρεία** η οποία περιλαμβάνει τις γρήγορες μονάδες (ντήζελ, αεριοστρόβιλους, υδροηλεκτρικές και αντλητικές μονάδες) που μπορούν να συγχρονιστούν και να αποδώσουν πλήρη ισχύ σε σύντομο χρονικό διάστημα.

- **Λειτουργικοί περιορισμοί θερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής**

Στους ΑΗΣ επιτρέπονται μόνο αργές αλλαγές ισχύος, λόγω περιορισμού των μηχανικών και θερμικών καταπονήσεων. Το πρόβλημα αυτό εξομαλύνεται στην περίπτωση ατμοηλεκτρικών και πετρελαϊκών σταθμών. Γενικά όμως κατά τον προγραμματισμό της ένταξης θερμοηλεκτρικών σταθμών πρέπει να ικανοποιούνται περιορισμοί όπως:

- **Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας (Minimum Up Time):** Από τη στιγμή που εντάσσεται μια μονάδα πρέπει να περάσει ορισμένος χρόνος πριν αποσυνδεθεί η μονάδα από το δίκτυο.
- **Ελάχιστος χρόνος κράτησης (Minimum Down Time):** Από τη στιγμή που θα αποσυνδεθεί μια μονάδα πρέπει να περάσει ορισμένος χρόνος πριν ξανασυνδεθεί η μονάδα στο δίκτυο.
- **Κόστος εκκίνησης** Κατά τη διαδικασία της εκκίνησης μιας θερμικής μονάδας πρέπει να δαπανηθεί κάποια επιπλέον ενέργεια. Το κόστος αυτής της ενέργειας ονομάζεται **κόστος εκκίνησης** (start up cost). Το κόστος εκκίνησης είναι συνάρτηση του προηγούμενου χρόνου κράτησης. Η ανώτατη τιμή του ονομάζεται κόστος **ψυχρής εκκίνησης**. Αντίστοιχα κατά τη διαδικασία κράτησης χρειάζεται να δαπανηθεί ενέργεια για την σταδιακή μείωση της εξόδου της και την αποφυγή απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών, οπότε έχουμε και το αντίστοιχο **κόστος κράτησης** της μονάδας (shut – down cost).
- **Περιορισμοί προσωπικού (Crew Constraints):** Ο περιορισμός αναφέρεται στην περίπτωση που σε ένα σταθμό υπάρχουν δύο ή περισσότερες μονάδες που δεν μπορούν να συνδεθούν συγχρόνως στο δίκτυο λόγω περιορισμένου προσωπικού.
- **Υποχρεωτική λειτουργία μονάδων (Must run).** Για λόγους ασφαλείας και ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος ορισμένες μονάδες πρέπει να λειτουργούν υποχρεωτικά για κάποια χρονικά διαστήματα ανεξάρτητα αν είναι οι πιο οικονομικές. Τυπικοί λειτουργικοί λόγοι που επιβάλλουν την

υποχρεωτική λειτουργία μονάδων είναι η στήριξη της τάσης του δικτύου, η ευστάθεια του συστήματος, η περιορισμένη ικανότητα του συστήματος μεταφοράς, η χρήση του ατμού της μονάδας για τηλεθέρμανση κτλ.

- **Περιορισμοί καυσίμου.** Σε ορισμένες περιπτώσεις η ικανότητα του σταθμού παραγωγής περιορίζεται από το ρυθμό τροφοδοσίας του με καύσιμα και τη διαθεσιμότητα αυτών. Σε άλλες περιπτώσεις, ο σταθμός θα πρέπει να καταναλώσει τουλάχιστον μια ποσότητα καυσίμου κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου προγραμματισμού παραγωγής
- **Περιβαλλοντικοί περιορισμοί.** Η συμμόρφωση των *θερμικών σταθμών* με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς πιθανόν να επηρεάζουν τη δυνατότητα βέλτιστης οικονομικά λειτουργίας τους. Άλλοτε περιορίζεται ο ρυθμός εκπομπής ρύπων, μειώνοντας έτσι τη μέγιστη παραγωγή της μονάδας και άλλες φορές η συνολική ποσότητα ενός ρύπου που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα κατά διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος.

Παρακάτω περιγράφεται το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου που με την επίλυση του απαντάται το πως πρέπει να κατανεμηθεί το φορτίο στους σταθμούς ώστε να παραχθεί η απαιτούμενη ενέργεια με το ελάχιστο κόστος. Είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Στην πιο απλή μορφή του προβλήματος ελαχιστοποιείται το κόστος λειτουργίας, υπό τον περιορισμό η συνολική παραγωγή από τις θερμικές μονάδες να ισούται με τη ζήτηση φορτίου από τους καταναλωτές.

$$\min_{P_i} \sum_{i=1}^N F_i(P_i)$$

Υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{i=1}^N P_i = L$$

Όπου P_i είναι η παραγωγή ισχύος της μονάδας i

$F_i(P_i)$ είναι το κόστος παραγωγής από τη μονάδα i για ισχύ λειτουργίας P_i

Επίσης $F_i(P) = a_i + b_i \cdot P + c_i \cdot P^2$ με a_i, b_i, c_i οι συντελεστές κόστους κάθε μονάδας i .

Ένας τρόπος επίλυσης του παραπάνω προβλήματος είναι με τη χρήση της μεθόδου LaGrange. Συνδυάζεται η αντικειμενική συνάρτηση και ο εξισωτικός περιορισμός ως εξής:

$$L(P_1, P_2, \dots, P_N, \lambda) = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) + \lambda \cdot \left[L - \sum_{i=1}^N P_i \right] \quad (3.1)$$

Οι απαραίτητες συνθήκες βέλτιστου για τη συνάρτηση LaGrange είναι ο μηδενισμός των μερικών παραγώγων ως προς τις N+1 ανεξάρτητες μεταβλητές P_1, \dots, P_N και λ .

Η μερική παράγωγος ως προς τον πολλαπλασιαστή LaGrange δίνει τον εξισωτικό

προορισμό $\sum_{i=1}^N P_i = L$ και οι μερικές παράγωγοι ως προς τις ισχύεις εξόδου των μονάδων

δίνουν:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0 \quad (3.2)$$

ή

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda, \quad i=1, \dots, N \quad (3.3)$$

Η σχέση αυτή μας δείχνει ότι η απαραίτητη συνθήκη για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας είναι να λειτουργούν όλες οι θερμικές μονάδες του συστήματος με το ίδιο διαφορικό κόστος λειτουργίας (€/MWh) το οποίο ισούται με τον πολλαπλασιαστή LaGrange. Ο πολλαπλασιαστής LaGrange, λ , δίνει την αύξηση του βέλτιστου ωριαίου κόστους λειτουργίας του συστήματος σε €/h όταν αυξηθεί το φορτίο του συστήματος κατά 1 MW.

Πρέπει όμως να ληφθούν υπόψη και οι περιορισμοί που προαναφέρθηκαν έτσι η μοντελοποίηση του προβλήματος γίνεται ως εξής:

$$\min \quad TC = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} \left(St_{ij} \cdot Fuel_Cost_i \cdot FC_i(P_{ij}) \cdot \Delta T_j + SC_{ij} \right)$$

$$\text{με} \quad i = 1, \dots, N_g, \quad j = 1, \dots, T$$

Υπό τους περιορισμούς:

- **Ισοζύγιο ισχύος**

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{ij} = L_j \quad (3.4)$$

- Τεχνικό μέγιστο και ελάχιστο παραγωγής θερμικών μονάδων

$$P_{i,\min} < P_{ij} < P_{i,\max} \quad \forall i, j$$

(3.5)

- Ρυθμός ανάληψης φορτίου

$$\frac{|P_{i,j} - P_{i,j-1}|}{\Delta T_j} \leq R_{c_{i,\max}} \quad \forall i, j \quad (3.6)$$

- Όριο εκπομπής ρύπων CO₂

$$\sum_{i=1}^{N_g} c_i \cdot P_{ij} \cdot FC_i(P_{ij}) \cdot \Delta T_j \leq GHG_{\text{limit}} \quad \forall j \quad (3.7)$$

- Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας θερμικής μονάδας

$$t_{\rightarrow OFF,i} - t_{\rightarrow ON,i} \geq T_{ON_min,i} \quad \forall i \quad (3.8)$$

- Ελάχιστος χρόνος κράτησης θερμικής μονάδας

$$t_{\rightarrow ON,i} - t_{\rightarrow OFF,i} \geq T_{OFF_min,i} \quad \forall i \quad (3.9)$$

- Εφεδρεία για την αποφυγή blackout

$$\sum_{i=1}^{N_g} St_{ij} \cdot P_{i,\max} - L_j \geq \max \{P_{i,\max}\} \quad \forall j \quad (3.10)$$

Όπου:

c ο συντελεστής μετατροπής καυσίμου σε εκπομπές CO₂ (grCO₂/grFuel)

$FC_i(P_{ij})$ κατανάλωση καυσίμου της μονάδας i στο χρονικό διάστημα j όταν παράγει ισχύ

P_{ij} , δηλαδή ισχύει ότι:

$$SFC_i(P_{ij}) = \frac{FC_i(P_{ij})}{P_{ij}} \quad (3.11)$$

$Fuel_Cost_i$: το κόστος καυσίμου της μονάδας i ανα μονάδα μέτρησης του (m.u./kgFuel).

$i=1, \dots, N_g$: δείκτης για τις θερμικές μονάδες

$j=1, \dots, T$: δείκτης για τα χρονικά διαστήματα

L_j : ηλεκτρικό φορτίο κατά την j ώρα

$m.u.$: νομισματική μονάδα

min, max : δείκτης δήλωσης ελαχίστου και μεγίστου

N : αριθμός καταστάσεων στο πλέγμα του $\Delta\Pi$

N_g : αριθμός θερμικών μονάδων

P_{ij} : παραγωγή (MW) της μονάδας i στο χρονικό διάστημα j .

$PCij$: κόστος παραγωγής της i κατάστασης κατά τη j ώρα παραγωγής

$Rc_{i,max}$: Μέγιστος ρυθμός αλλαγής φορτίου μονάδας i

$SCi \rightarrow On$: κόστος εκκίνησης(m.u.) της μονάδας i

$SCij = \{SCi \rightarrow On, 0\}$: κόστος εκκίνησης(m.u.) της μονάδας i στο χρονικό διάστημα j (0 αν η μονάδα δεν εκκινεί).

SFC : Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kgFuel/MWh)

St_{ij} : δείκτης λειτουργίας i ΘΜ κατά τη j ώρα παραγωγής

($St_{ij}=1$, ΘΜ παράγει, $St_{ij}=0$ ΘΜ δεν παράγει).

T : χρονική περίοδος προγραμματισμού

TC : συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος.

$t_{\rightarrow ON,i}, t_{\rightarrow OFF,i}$: Χρονικά σημεία σβέσης, έναυσης της i ΘΜ.

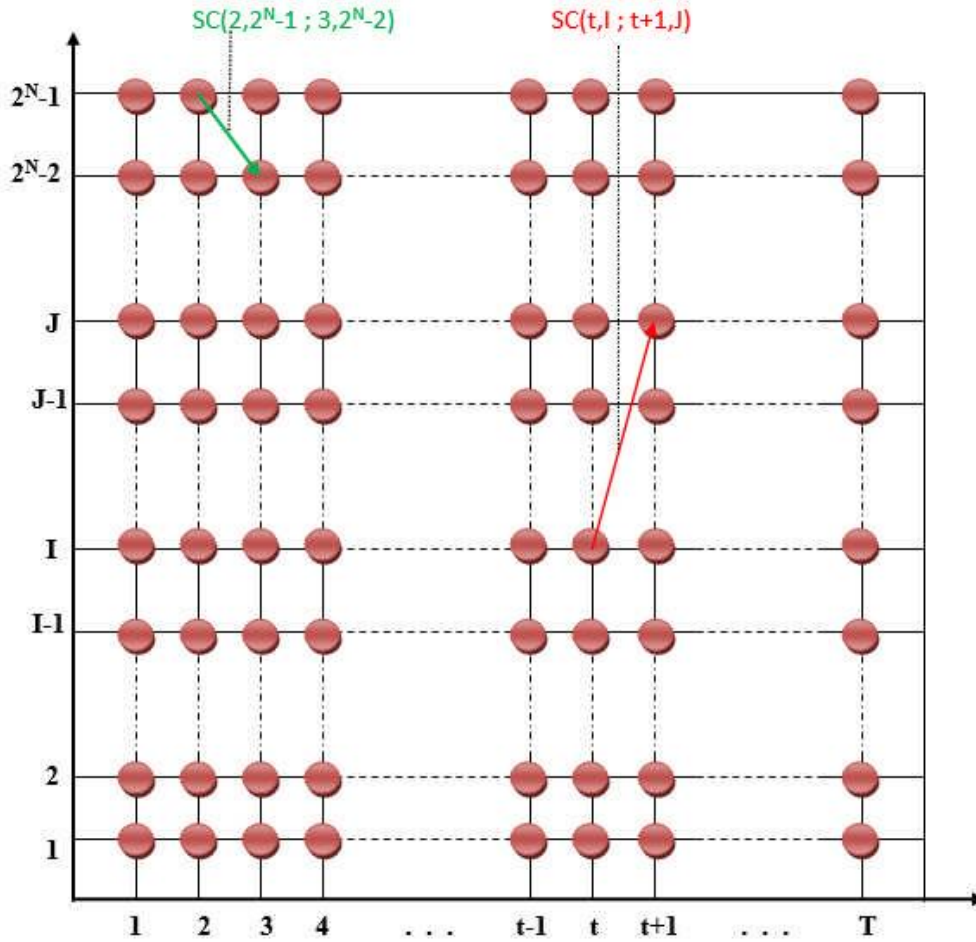
$T_{OFF_min,i}, T_{ON_min,i}$: Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας και κράτησης i ΘΜ

ΔT_j : το j υποδιάστημα της χρονικής περιόδου προγραμματισμού

Τέλος αναφέρεται ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος ένταξης των μονάδων με δυναμικό προγραμματισμό (ΔΠ). Ο Δ.Π είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης που εφαρμόζεται σε προβλήματα όπου πρέπει να ληφθεί μια ακολουθία διαδοχικών αποφάσεων. Η αρχική ή η τελική κατάσταση του συστήματος είναι συνήθως γνωστή και αναζητείται μια ακολουθία αποφάσεων που αν εφαρμοστεί στην αρχική κατάσταση δίνει μια ακολουθία καταστάσεων που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί κάποιο κριτήριο. Η ένταξη των μονάδων είναι ένα δύσκολο πρόβλημα καθώς ο συνδυασμός των μονάδων που θα λειτουργήσουν κατά τη διάρκεια μιας ώρας δεν μπορεί να υπολογιστεί ανεξάρτητα από το συνδυασμό μονάδων των προηγούμενων και επόμενων ωρών. Εκτός αυτού πρέπει να λειφθούν υπόψη όλοι οι περιορισμοί που προαναφέρθηκαν γεγονός που κάνει το πρόβλημα ακόμα πιο πολύπλοκο. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί καταστάσεων μονάδων και ωρών που πρέπει να εξεταστούν είναι $\underbrace{(2^N - 1) \cdot (2^N - 1) \cdot \dots \cdot (2^N - 1)}_{T \text{ φορές}} = (2^N - 1)^T$.

Για έναν 24ωρο προγραμματισμό ο αριθμός $(2^N - 1)^{24}$ είναι πολύ μεγάλος ακόμα και για μικρές τιμές του N .

Στο πρόβλημα λοιπόν αυτό το πλέγμα του χώρου κατάστασης του δυναμικού προγραμματισμού φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.2: Πλέγμα Χώρου Κατάστασης N Μονάδων (πλήρης απαρίθμηση συνδυασμών)

Το πλέγμα καθορίζεται από τα στάδια και τις καταστάσεις, όπου τα **στάδια** φαίνονται στον άξονα των τετμημένων και είναι οι χρόνοι στην περίπτωση του προβλήματος αυτού και οι **καταστάσεις** απεικονίζονται στον άξονα των τεταγμένων και είναι οι διάφοροι συνδυασμοί των μονάδων. Κάθε σημείο του πλέγματος ορίζεται από το διατεταγμένο ζεύγος (στάδιο, κατάσταση). Στην πλήρη απαρίθμηση υπάρχουν $2^N - 1$ διαφορετικές καταστάσεις σε κάθε ώρα.

Η αναδρομική σχέση για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους λειτουργίας του συστήματος στο σημείο (t, I) είναι:

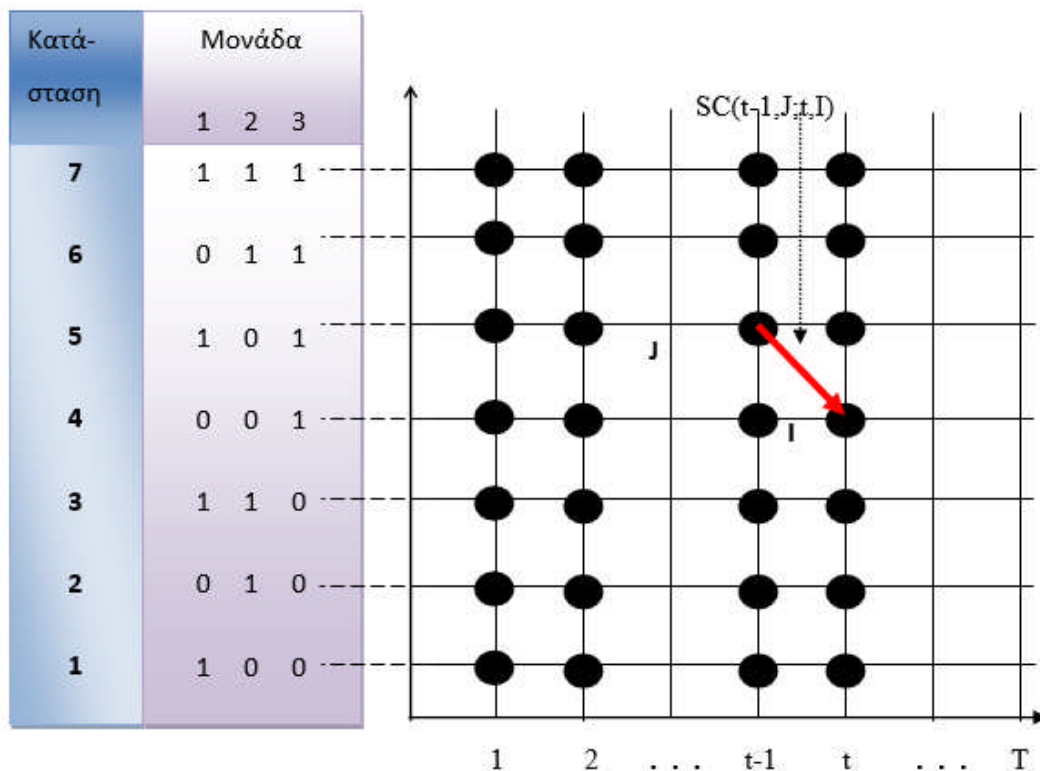
$$TC(t, I) = \min_{\forall J \in \mathcal{S}} \{ PC(t, I) + SC(t-1, J; t, I) + TC(t-1, J) \} \quad (3.12)$$

TC (t, I): το ελάχιστο κόστος λειτουργίας τις t πρώτες ώρες λειτουργίας του συστήματος, αν κατά την ώρα t βρισκόμαστε στην κατάσταση I (συνδυασμό μονάδων).

PC (t, I): το ελάχιστο κόστος παραγωγής κατά τη διάρκεια της ώρας t , αν κατά την ώρα t βρισκόμαστε στην κατάσταση I .

SC (t-1, J ; t, I): το κόστος μετάβασης από την κατάσταση (t-1, J) στην κατάσταση (t, I). Το κόστος μετάβασης SC περιλαμβάνει το κόστος εκκίνησης και σβέσης των μονάδων που θα εκκινήσουν και θα κρατηθούν κατά την μετάβαση από J σε I. Τείνει στο άπειρο όταν δεν επιτρέπεται η συγκεκριμένη μετάβαση.

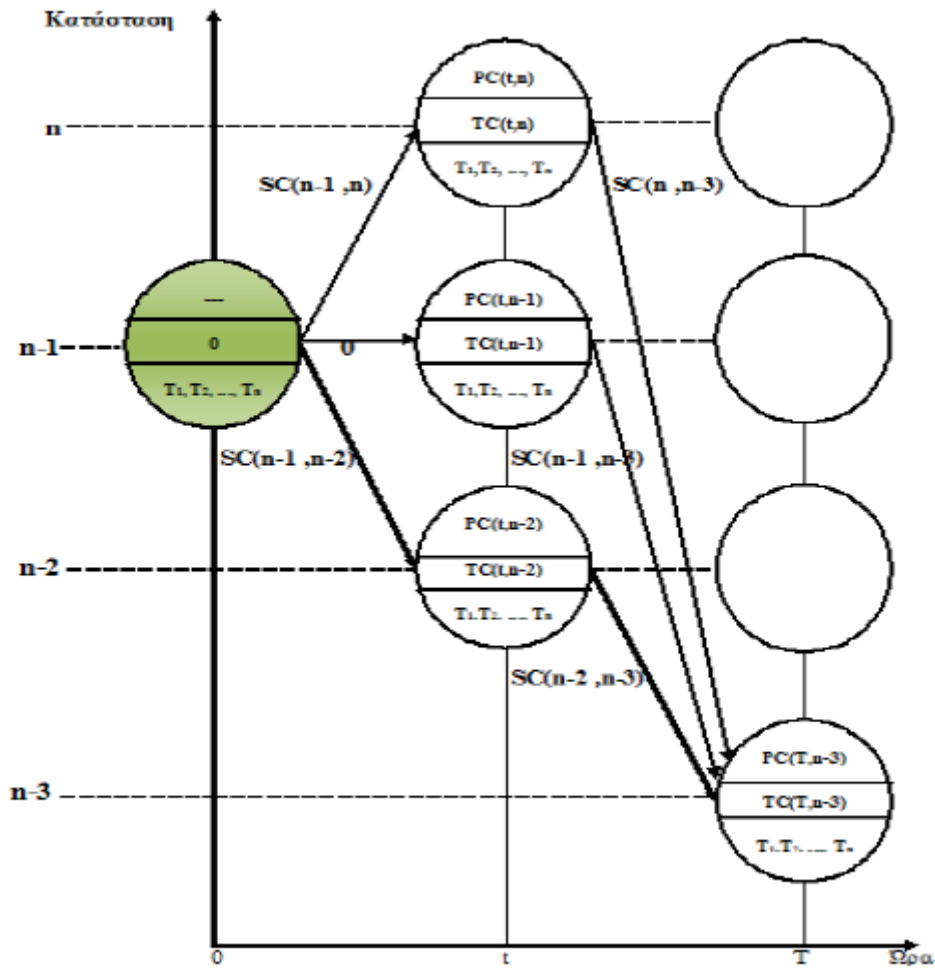
\mathfrak{I} : το σύνολο των δυνατών καταστάσεων στο στάδιο t-1



Εικόνα 3.3: Πλέγμα Χώρου Κατάστασης 3 Μονάδων

Κάθε σημείο του πλέγματος μπορεί να συμβολιστεί με έναν κύκλο, ο οποίος περιέχει τρεις σειρές αριθμών. Η **πρώτη σειρά** περιλαμβάνει το κόστος παραγωγής των μονάδων για την κάλυψη του φορτίου στην ώρα t . Η **δεύτερη σειρά** περιλαμβάνει το συνολικό κόστος, $TC(t, I)$, από την πρώτη ώρα μέχρι την ώρα t . Η **τρίτη σειρά** περιλαμβάνει μια σειρά αριθμών (T_1, T_2, \dots, T_n), που αντιστοιχούν στις ώρες συνεχούς λειτουργίας ή κράτησης των μονάδων (<0 για κράτηση). με βέλη φαίνονται όλες οι πιθανές μεταβάσεις και με έντονη διαγράμμιση αυτά που συνεπάγονται το μικρότερο συνολικό κόστος λειτουργίας σε κάθε σημείο του πλέγματος. Αφού προσδιοριστούν όλα τα σημεία του πλέγματος που αντιστοιχούν σε δυνατές καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος και τους ανατεθεί η προηγούμενη πληροφορία, ο καθορισμός της βέλτιστης διαδρομής στο πλέγμα γίνεται αρχίζοντας από το τέλος του πλέγματος.

Για $t = T$, επιλέγουμε την κατάσταση με το ελάχιστο συνολικό κόστος $TC(T,I)$, προχωρώντας μέχρι $t=0$ ακολουθώντας τα έντονα βέλη σχηματίζοντας έτσι τη βέλτιστη διαδρομή.

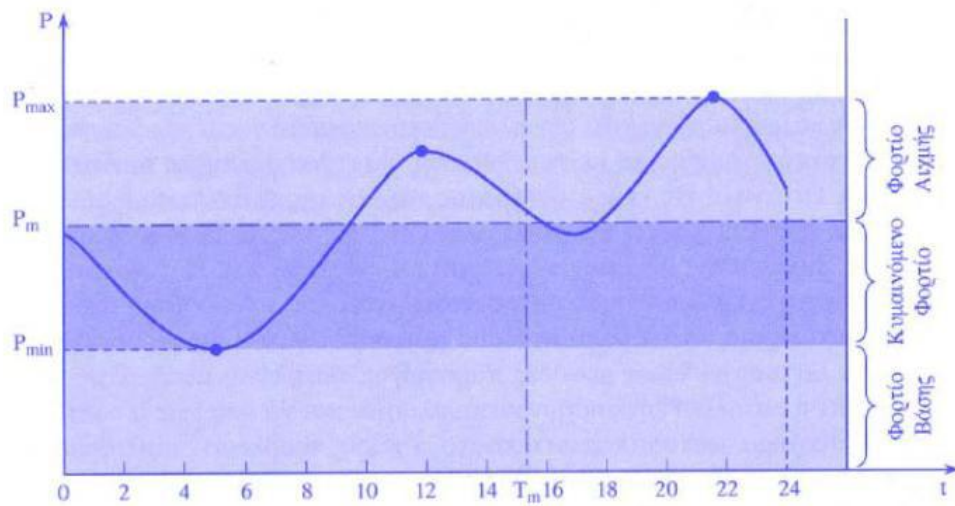


Εικόνα 3.4: Κόστη και χρόνοι για τα σημεία του πλέγματος

3.4 Χαρακτηριστικά και πρόβλεψη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα σημαντικό ζήτημα που επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου. Η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει ημερήσιες και εβδομαδιαίες κυκλικές μεταβολές. Η πρόβλεψη της ζήτησης και του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικές για την ασφαλή και οικονομική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Βάσει της πρόβλεψης ζήτησης και των προσφορών των μονάδων παραγωγής προσδιορίζεται η ένταξη τους στο σύστημα (Unit Commitment) και ο οικονομικά βέλτιστος τρόπος λειτουργίας τους (Unit Dispatch). Κάποιες μονάδες, οι λιγότερο ανταγωνιστικές, θα λειτουργούν μόνο για την κάλυψη των αιχμών ζήτησης, αυξάνοντας το κόστος παραγόμενης ενέργειας.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη φορτίου



Εικόνα 3.5: Τυπική καμπύλη φορτίου

Υπάρχουν 4 είδη πρόβλεψης ανάλογα με τη χρονική εμβέλεια την οποία καλύπτουν.

- **Πολύ βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη** που καλύπτει χρονικό διάστημα δευτερολέπτων έως μερικών λεπτών και έτσι στο ΣΗΕ, βάσει αυτής της πρόβλεψης, γίνεται αυτόματος έλεγχος φορτίου και οικονομική κατανομή φορτίου.
- **Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη** που καλύπτει χρονικό διάστημα ωρών ή εβδομάδων. Βάσει αυτής πραγματοποιείται η ένταξη μονάδων, η υδροθερμική συνεργασία και ανταλλαγές ισχύος.

- **Μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη** που καλύπτει μήνες έως και χρόνια και βάσει αυτής γίνεται ο προγραμματισμός καυσίμων, υπολογίζεται ο βαθμός ανάγκης χρήσης των υδάτινων πόρων και ο προγραμματισμός συντήρησης μονάδων.
- **Μακροπρόθεσμη πρόβλεψη** που καλύπτει από 10 έως 25 χρόνια και σε αυτήν βασίζεται ο προγραμματισμός ένταξης νέων μονάδων.

Οι προβλέψεις του ΑΔΜΗΕ για την εξέλιξη της ζήτησης ενέργειας στο ΕΣΜΗΕ κατά την επόμενη δεκαετία βασίζονται στα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία της ζήτησης και σε δημοσιευμένες προβλέψεις που έχουν εκπονηθεί από άλλους αρμόδιους φορείς (μεσοπρόθεσμη εξέλιξη του ΑΕΠ, μακροπρόθεσμες προβλέψεις της ζήτησης κλπ), λαμβάνοντας υπόψη τυχόν διαθέσιμες προβλέψεις προμηθευτών.

Η πρόβλεψη ζήτησης ενέργειας αντιμετωπίζεται με τη χρήση σεναρίων (εύλογες υποθέσεις σχετικά με το τι θα μπορούσε να συμβεί στο μέλλον βασισμένες στην προηγούμενη και τρέχουσα εμπειρία, αλλά και υποθέσεις σχετικά με το πώς οι σχετικές τάσεις μπορεί να εξελιχθούν). Διαμορφώνονται τρία σενάρια εξέλιξης της ζήτησης: Φορτίο αιχμής, φορτίο κυμαινόμενο και φορτίο βάσης

Προβλέψεις ετήσιων αιχμών φορτίου

Η πρόβλεψη της αιχμής παρουσιάζει εν γένει πολύ μεγαλύτερη αβεβαιότητα από την πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ζήτηση ισχύος, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, όπου εμφανίζεται η μέγιστη ετήσια αιχμή, εξαρτάται πολύ από τον καιρό και κυρίως από τη θερμοκρασία αλλά και από τη διάρκεια των περιόδων υψηλών θερμοκρασιών. Επιπλέον η αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ αυξάνει την αβεβαιότητα της πρόβλεψης. Μάλιστα η πρόβλεψη της ετήσιας αιχμής καθίσταται ακόμα δυσκολότερη λόγω των δύσκολων συνθηκών που επικρατούν στη χώρα καθώς δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί η επίπτωση της οικονομικής ύφεσης στη συμπεριφορά των καταναλωτών κατά τις ώρες των θερινών αιχμών, ειδικά σε συνθήκες παρατεταμένου καύσωνα.

Οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα σε μεσο-μακροπρόθεσμη βάση είναι:

- **Οικονομικοί παράγοντες**
 - Η οικονομική ανάπτυξη της χώρας (με βασικό δείκτη μέτρησης το ΑΕΠ).

- Οι αλλαγές στις καταναλωτικές συνήθειες (κλιματισμός, χρήση ηλεκτρισμού στις μεταφορές, χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, κλπ.) λόγω βελτίωσης βιοτικού επιπέδου, αλλά και η βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης συγκεκριμένων πληθυσμιακών ομάδων (π.χ. οικονομικοί μετανάστες).
 - Η γενικότερη κατάσταση του ενεργειακού τομέα και της αγοράς ηλεκτρισμού (επίπεδο τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, ανταγωνισμός με Φυσικό Αέριο, κλπ.)
 - Ειδικές συνθήκες (π.χ. υλοποίηση έργων Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης)
 - Διάφορα μέτρα εξειδίκευσης πολιτικών, όπως εξοικονόμηση ενέργειας, περιβαλλοντικοί περιορισμοί κλπ.
 - Αλλαγές στην τιμολογιακή πολιτική γιατί παρόλο που η τιμή του ρεύματος είναι ανελαστικό μέγεθος, ακόμα και η μικρή αλλαγή της επηρεάζει το φορτίο.
- **Εποχιακοί παράγοντες:** Το φορτίο παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις στα πλαίσια του έτους αλλά ακόμα και του εικοσιτετραώρου. Οι αλλαγές αυτές οφείλονται κυρίως στις καιρικές συνθήκες και τις ανθρώπινες δραστηριότητες, αντίστοιχα.
 - Οι εποχιακές μεταβολές επιδρούν στη μορφή της καμπύλης φορτίου, όπου π.χ παρατηρούνται στην Ελλάδα μέγιστες τιμές ζήτησης το καλοκαίρι και ελάχιστες την άνοιξη γιατί τότε υπάρχουν οι ιδανικές συνθήκες διαβίωσης.
 - Ο εβδομαδιαίος και ημερήσιος κύκλος επηρεάζουν το φορτίο γιατί καθορίζουν την περιοδικότητα του κύκλου εργασίας – ανάπαυσης του πληθυσμού. Για παράδειγμα το Σαββατοκύριακο η ζήτηση είναι μειωμένη όπως και τη Δευτέρα και την Παρασκευή (ως πρώτη και τελευταία εργάσιμη μέρα αντίστοιχα) η ζήτηση είναι ελαφρώς διαφορετική από τις υπόλοιπες εργάσιμες μέρες.
 - Κατά την περίοδο των εθνικών και θρησκευτικών εορτών αλλά και στις αργίες η ζήτηση φορτίου είναι πολύ σημαντικά χαμηλότερη από τα φυσιολογικά επίπεδα.
 - **Μετεωρολογικοί:** Σημαντική επίδραση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχει κυρίως η θερμοκρασία και σε μικρότερο βαθμό η υγρασία, η βροχόπτωση, η ηλιοφάνεια, οι νεφώσεις και άλλες καιρικές συνθήκες. Αυτό συμβαίνει γιατί η

λειτουργία ενός μεγάλου ποσοστού ηλεκτρικών συσκευών, όπως αυτές της θέρμανσης, του κλιματισμού της άρδευσης, εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες.

Αυτό που έχει όμως τη σημαντικότερη επίδραση στη διαμόρφωση του φορτίου είναι η θερμοκρασία. Σε ΣΗΕ που καλύπτουν μεγάλη γεωγραφική έκταση χρειάζεται να ληφθούν υπόψη οι θερμοκρασίες σε διάφορες περιοχές.

Στην Ελλάδα τα υπάρχοντα μοντέλα πρόβλεψης φορτίου λαμβάνουν υπόψη τους δύο θερμοκρασίες (Αθήνας και Θεσσαλονίκης) ως ενδεικτικές για το διασυνδεδεμένο σύστημα, ενώ για το απομονωμένο σύστημα της Κρήτης μόνο μία.

3.5 Ικανότητα Μεταφοράς

Σε κάθε ΣΗΕ υπάρχει η ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα στο Ελληνικό ΣΗΕ υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση σταθμών παραγωγής στο βόρειο τμήμα της χώρας ενώ το κύριο κέντρο κατανάλωσης βρίσκεται στο νότο. Δεδομένου μάλιστα ότι οι διεθνείς διασυνδέσεις με Βουλγαρία, ΠΓΔΜ και Αλβανία) είναι στο βορρά υπάρχει μεγάλη ανισορροπία παραγωγής και φορτίου.

Η ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί με μία γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης αυτής. Επομένως με τη χρήση υψηλών και κυρίως υπερυψηλών τάσεων επιτυγχάνεται η μεταφορά πολύ μεγάλων ποσοτήτων ισχύος με μειωμένες απώλειες που καθιστούν οικονομικότερη τη λειτουργία με τις τάσεις αυτές. Μέρος όμως της επιτευχθείσας οικονομίας στο κόστος λόγω εφαρμογής υψηλότερης τάσης χάνεται από τις αυξημένες διηλεκτρικές απώλειες στον περιβάλλοντα αέρα και από το αυξημένο κόστος μονωτήρων, μετασχηματιστών, διακοπών κτλ. Υπάρχει δηλαδή κάποια μέγιστη τιμή τάσης πάνω από την οποία γίνεται αντιοικονομική η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας και αντίστροφα. Το κόστος μεταφοράς αυξάνεται όταν από μια γραμμή με μεγάλη ικανότητα μεταφοράς περνάει μικρή ποσότητα ισχύος.

Τα υλικά που γενικά χρησιμοποιούνται στους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Ένας σύνθετος αγωγός, το ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) αποτελείται από κλώνους αλουμινίου, τοποθετημένους γύρω από ένα χαλύβδινο κεντρικό πυρήνα, ο οποίος παρέχει μηχανική αντοχή στον αγωγό. Η απαιτούμενη διατομή ενός αγωγού καθορίζεται από το ρεύμα που τον διαρρέει, αφού η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του αγωγού. Σε υψηλές θερμοκρασίες η μηχανική αντοχή του αγωγού μειώνεται και έτσι η αυξημένη θερμοκρασία του λόγω των ωμικών απωλειών δε πρέπει να ξεπερνάει ένα ορισμένο όριο. Το αντίστοιχο ρεύμα, το οποίο προκαλεί αυτήν την αύξηση της θερμοκρασίας ονομάζεται ικανότητα μεταφοράς ρεύματος του αγωγού.

Οι αγωγοί υψηλής τάσης των εναέριων γραμμών μεταφοράς αναρτώνται από τους πυλώνες ή πύργους της γραμμής διαμέσου μονωτήρων, ο καθένας από τους οποίους αποτελείται από μια αλυσσο δίσκων από πορσελάνη ή γυαλί. Η αύξηση της μόνωσης για υψηλότερες τάσεις μεταφοράς αντιμετωπίζεται με την προσθήκη περισσότερων δίσκων στους αλυσσοειδείς μονωτήρες. Η μόνωση μεταξύ των αγωγών και μεταξύ αγωγών και γης αποτελείται από τον αέρα που υπάρχει μεταξύ τους.

Τα τυποποιημένα είδη εναέριων γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ελλάδα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Επίπεδο τάσης (kV)	Κύκλωμα	Χαρακτηρισμός Γ.Μ.	Αριθμός & διατομή αγωγών ανά φάση (Τύπος ACSR)		Θερμικό όριο υπό ονομαστικές συνθήκες (MVA)	Θερμικό όριο υπό δυσμενείς συνθήκες (MVA) [*]
			(MCM)	(mm ²)		
66	Απλό	E/66	1x336,4	1x170	60,5	36
150	Απλό	E/150	1x336,4	1x170	138	117
150	Απλό	B/150	1x636,0	1x322	202	169
150	Διπλό	2B/150	1x636,0	1x322	2x202	2x169
400	Απλό	B'B'/400	2x954,0	2x483	1400	1100
400	Διπλό	2B'B'/400	2x954,0	2x483	2x1400	2x1100
400	Απλό	B'B'B'/400	3x954,0	3x483	2000	1600

Εικόνα 3.6: Τυποποιημένα είδη εναέριων γραμμών

Ο χαρακτηρισμός μιας γραμμής αφορά τον τύπο της γραμμής (ελαφρού ή βαρέος ή υπερβαρέος τύπου, E, B και B' αντίστοιχα), τον αριθμό των κυκλωμάτων (το 2 υποδηλώνει γραμμή διπλού κυκλώματος) ενώ το B'B' στις γραμμές των 400kV αναφέρεται στη χρησιμοποίηση 2 αγωγών, στερεωμένων σε μικρή απόσταση μεταξύ τους ανά φάση (και κύκλωμα). Όλοι οι αγωγοί είναι τύπου ACSR και οι διατομές των αγωγών μεταφοράς εκφράζονται σε mil circular mils (MCM) σύμφωνα με την αμερικανική τυποποίηση (1 MCM=0,5067mm²).

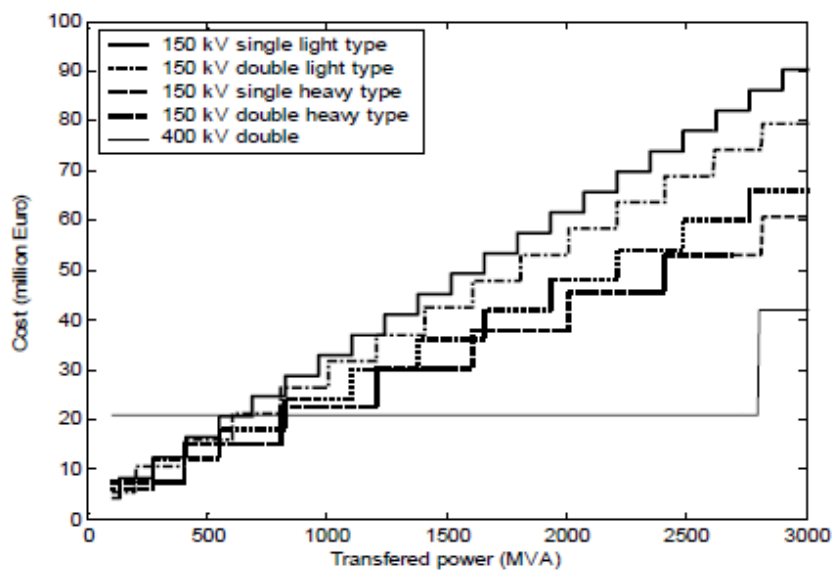
Μεγαλύτερη αξιοπιστία μεταφοράς έχουν όπως είναι φυσικό οι γραμμές απλού κυκλώματος, όταν δηλαδή οι ζώνες διελεύσεως των γραμμών χωρίζονται μεταξύ τους με σημαντική απόσταση. Όπου όμως είναι δύσκολη η εξεύρεση επαρκών διαδρομών διελεύσεως, όπως οι διαδρομές ορεινού χαρακτήρα ή και για λόγους μικρότερου κόστους μεταφοράς, εις βάρος όμως της αξιοπιστίας, χρησιμοποιούνται γραμμές διπλού κυκλώματος, στις οποίες δύο ανεξάρτητα τριφασικά κυκλώματα φέρονται σε κοινούς πυλώνες. Η χρησιμοποίηση δύο ή και τριών αγωγών ανά φάση γίνεται στην υπερυψηλή τάση για τη μεταφορά ακόμα μεγαλύτερων ποσοτήτων ισχύος από την ίδια οδό διέλευσης.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των γραμμών καθώς και το προσεγγιστικό κόστος εγκατάστασης τους παρατίθενται στον επόμενο πίνακα:

Τύπος γραμμής	R (Ω/km)	X (Ω/km)	b ($\mu\text{S}/\text{km}$)	I_{max} (A)	Κόστος (κ€/km)
E/150kV	0,183	0,446	2,584	530	41
B/150kV	0,097	0,422	2,738	775	53
2B/150kV	0,194	0,391	2,919	1550	38
B'B'/400kV	0,033	0,318	3,570	2020	103

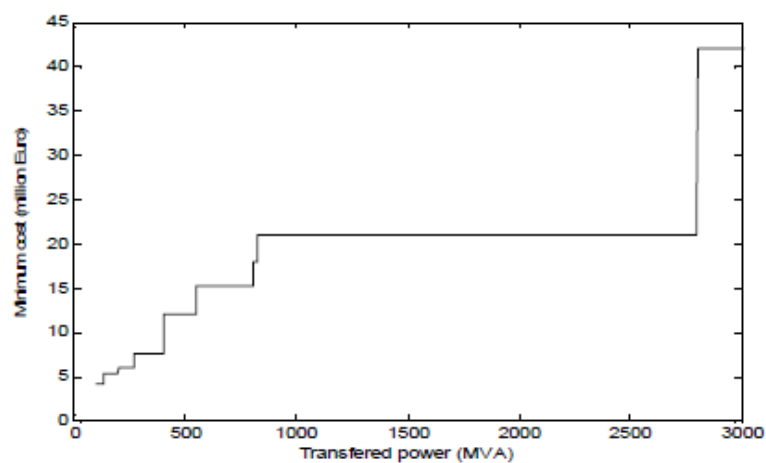
Εικόνα 3.7: Χαρακτηριστικά εναέριων γραμμών

Ακολουθεί η γραφική παράσταση του κόστους για κάθε τύπο γραμμής σε συνάρτηση με τη μεταφερόμενη ισχύ για 100km



Εικόνα 3.8: Κόστος γραμμών μεταφοράς ανά μεταφερόμενη ισχύ

Από τα διαγράμματα της Εικόνας 2.74 προκύπτει ότι το ελάχιστο κόστος γραμμών μεταφοράς ανά μεταφερόμενη ισχύ είναι:



Εικόνα 3.9: Ελάχιστο κόστος γραμμών μεταφοράς ανά μεταφερόμενη ισχύ

Με βάση αποτελέσματα ανάλυσης που συνέταξε ο ΔΕΣΜΗΕ [4] συμπεραίνεται ότι για λόγους ασφάλειας του Ελληνικού συστήματος, η Συνολική Ικανότητα Μεταφοράς από και προς τις κύριες βόρειες διασυνδέσεις (με Βουλγαρία και ΠΓΔΜ) είναι της τάξεως των 800MW ενώ από και προς Ιταλία είναι 500MW. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής 100-120MW από την Αλβανία υπό πολύ ειδικές συνθήκες όμως. Οι εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται κυρίως για οικονομικούς λόγους, αφού κοστίζουν φθηνότερα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πετρελαϊκές μονάδες, παρά από αδυναμία κάλυψης της ζήτησης από το σύστημα παραγωγής. Εισαγωγές και εξαγωγές προς κάποια ή κάποιες γειτονικές διασυνδέσεις γίνονται τις χρονικές στιγμές που ο διαχειριστής του συστήματος κρίνει ότι είναι οικονομικά συμφέρον αυτές να γίνουν και σύμφωνα πάντα με τα συμφωνηθέντα συμβόλαια και το προκαθορισμένο πρόγραμμα μεταξύ των συμβαλλομένων χωρών.

3.6 Προβλήματα λειτουργίας ΣΗΕ λόγω μεγάλης διείσδυσης των ΑΠΕ

Τόσο στο δίκτυο διανομής, στο σύστημα μεταφοράς όσο και στο σύστημα παραγωγής ενέργειας μπορεί να προκύψουν προβλήματα λόγω μεγάλης διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο. Ακολούθως γίνεται σύντομη αναφορά στα κυριότερα προβλήματα.

- Τα ηλεκτρικά δίκτυα σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν την ενέργεια μέσω των δικτύων διανομής με μονοκατευθυντική ροή προς τους καταναλωτές. Με τη διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο διανομής η κατεύθυνση ροής μπορεί να αλλάξει, διότι μικροί καταναλωτές μπορούν να παράγουν ενέργεια είτε από ανεμογεννήτριες είτε από ΦΒ στοιχεία και πλαίσια, και να τροφοδοτούν οι ίδιες το δίκτυο με την αντίθετη φορά από ότι ήδη έχει σχεδιαστεί το δίκτυο.

Οι σχετικές επιδράσεις λόγω αυτού είναι:

- Αλλαγές στο επίπεδο και την ποιότητα των δικτύων
 - Μεταβολή των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου, και αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης
 - Τροποποίηση της προστασίας του δικτύου
 - Αύξηση των παραγόμενων αρμονικών στο δίκτυο από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος των μονάδων ΑΠΕ
 - Επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος.
- Ένα ακόμα βασικό πρόβλημα το οποίο ανακύπτει από τη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο σχετίζεται με την πρόβλεψη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, με σκοπό την ικανοποίηση της ζήτησης. Οι μέθοδοι πρόβλεψης φυσικά έχουν αρκετές αποκλίσεις, για παράδειγμα οι σύγχρονες τεχνικές πρόβλεψης που υπάρχουν για την αιολική παραγωγή σε χρονικό ορίζοντα 24 έως 26 ώρες έχουν ένα σφάλμα που μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει το 30% της πραγματικής παραγωγής. Η ακρίβεια της πρόβλεψης σίγουρα αυξάνει σε μικρότερους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης. Συνεπώς η χρήση αξιόπιστων μετεωρολογικών δεδομένων και η γεωγραφική διασπορά των ΑΠΕ αυξάνει την ακρίβεια της πρόβλεψης.
 - Τέλος σχετικά με τη διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο, μπορεί να προκύψουν προβλήματα όσον αφορά την ένταξη των μονάδων (λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας). Οι κυριότεροι περιορισμοί που προκύπτουν σε σχέση με την οικονομική λειτουργία σε συνθήκες μεγάλης διείσδυσης ΑΠΕ είναι οι εξής:

- Στρεφόμενη εφεδρεία: απαιτείται η συνολική διαθέσιμη ισχύς των συγχρονισμένων στο δίκτυο μονάδων να είναι μεγαλύτερη του φορτίου ώστε να είναι δυνατή η αναπλήρωση της απώλειας της μεγαλύτερης εν λειτουργία μονάδας ή μειωμένης παραγωγής από τις ΑΠΕ.
- Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας: είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος αποσύνδεσης μιας μονάδας πριν αποσυνδεθεί από το δίκτυο.
- Ελάχιστος χρόνος κράτησης: είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος αποσύνδεσης μιας μονάδας πριν συνδεθεί ξανά.
- Υποχρεωτική λειτουργία μονάδων: λειτουργικοί λόγοι, όπως είναι η στήριξη της τάσης του δικτύου, η ευστάθεια του συστήματος, η περιορισμένη μεταφορική ικανότητα του συστήματος μεταφοράς επιβάλλουν την υποχρεωτική λειτουργία κάποιων μονάδων ιδίως όταν η επίδραση των ΑΠΕ στη λειτουργία του ΣΗΕ είναι αυξημένη.

4.Τεχνικές Λύσεις για την ενίσχυση της διείσδυσης των ΑΠΕ

4.1 Γενικά

Όπως προαναφέρθηκε η ενσωμάτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας επιφέρει δυσκολίες στην ομαλή λειτουργία του δικτύου, καθώς η παραγωγή μεταβάλλεται και δεν είναι απολύτως προβλέψιμη. Μάλιστα την ίδια στιγμή υπάρχουν και διαταραχές του ίδιου του δικτύου που επηρεάζεται από την συνεχή αλλαγή του φορτίου, τα τυχόν σφάλματα που παρουσιάζει το δίκτυο και τις βλάβες που μπορεί να εμφανίσει η συμβατική παραγωγή. Μελέτες διεθνώς καθώς και η εμπειρία των τελευταίων χρόνων έχουν δείξει ότι απαιτούνται νέες λύσεις για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων. Οι απαραίτητες λύσεις θα περιλαμβάνουν νέες τεχνολογικές μεθόδους και πρακτικές που θα εφαρμοστούν προκειμένου να παρέχουν περισσότερη ευελιξία, να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα των συστημάτων παραγωγής και για την εξισορρόπηση την παραγωγής και κατανάλωσης (ισοζύγιο ισχύος – φορτίου). Μόνο με αυτόν τον τρόπο το ΣΗΕ θα είναι αξιόπιστο και ασφαλές, αποφεύγοντας τυχόν διακοπές στην παροχή ρεύματος που θα οφείλονται στην ύπαρξη των ΑΠΕ.

Η απαιτούμενη ευελιξία του συστήματος παραγωγής μπορεί να επιτευχθεί με τη συνεργασία της συμβατικής παραγωγής και της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πρέπει καταρχάς να επιδιωχθεί η χρήση των ΑΠΕ να είναι σύμφωνη με τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου. Αυτό συνάδει με την άμβλυνση των επιπτώσεων από την παρεμβολή των ΑΠΕ στο σύστημα παραγωγής. Μέσω της βελτίωσης του σχεδιασμού και των τεχνολογιών ελέγχου, οι ΑΠΕ θα πρέπει να συμβάλουν στην αξιοπιστία και σταθερότητα του συστήματος. Ωστόσο η ευελιξία που μπορεί να επιτευχθεί με αυτή την προσέγγιση είναι περιορισμένη. Η ευελιξία της συμβατικής παραγωγής, που είναι η κύρια πηγή ενέργειας, αναφέρεται ως ‘‘ευέλικτη παραγωγή’’. Ευελιξία στο σύστημα μπορεί ακόμα να επιτευχθεί από την πλευρά του φορτίου μέσω της απόκρισης του καθώς και από την αποθήκευση ενέργειας που μπορεί να λειτουργήσει είτε ως παραγωγή είτε ως κατανάλωση. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα περιγραφούν αναλυτικότερα οι μέθοδοι για την αντιμετώπιση των τεχνικών ζητημάτων που προκύπτουν από τη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ.

4.2 ΑΠΕ φιλικές με το δίκτυο (Grid – Friendly RE generation)

4.2.1 Ανάγκη για ΑΠΕ φιλικές με το δίκτυο

Από όταν άρχισαν να αναπτύσσονται τα συστήματα παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας η τεχνολογία επικεντρώθηκε περισσότερο στην μέγιστη αξιοποίηση των πόρων από ΑΠΕ. Αμελήθηκε όμως ο έλεγχος της αξιοπιστίας και σταθερότητας του ΣΗΕ και έτσι υπήρξε έλλειψη προδιαγραφών, καθώς τα δίκτυα δεν ήταν σχεδιασμένα για να λειτουργούν οι ΑΠΕ σε μεγάλη κλίμακα. Όταν η διείσδυση των ΑΠΕ είναι χαμηλή, είναι διαχειρίσιμη η παραγωγή τους και μπορεί να γίνει αποδεκτή από τους διαχειριστές των συστημάτων. Όταν όμως η διείσδυση ενέργειας από ΑΠΕ αυξάνεται, αυτό μπορεί να έχει πολύ σοβαρό αντίκτυπο στην ομαλή λειτουργία του ΣΗΕ.

Έτσι, γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό το γεγονός ότι οι ΑΠΕ θα πρέπει να έχουν σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της σταθερότητας του ΣΗΕ. Αυτό φυσικά μπορεί να αυξήσει τις απαιτήσεις. Ωστόσο η τεχνολογία συνεχίζει να αναπτύσσεται στον τομέα της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, για αυτό και η παραγωγή τους πια είναι πιο προβλέψιμη και ελεγχόμενη, άρα και πιο εύχρηστη κατά την εισαγωγή τους στο δίκτυο.

4.2.2 Σύνθετα χαρακτηριστικά των μονάδων ΑΠΕ

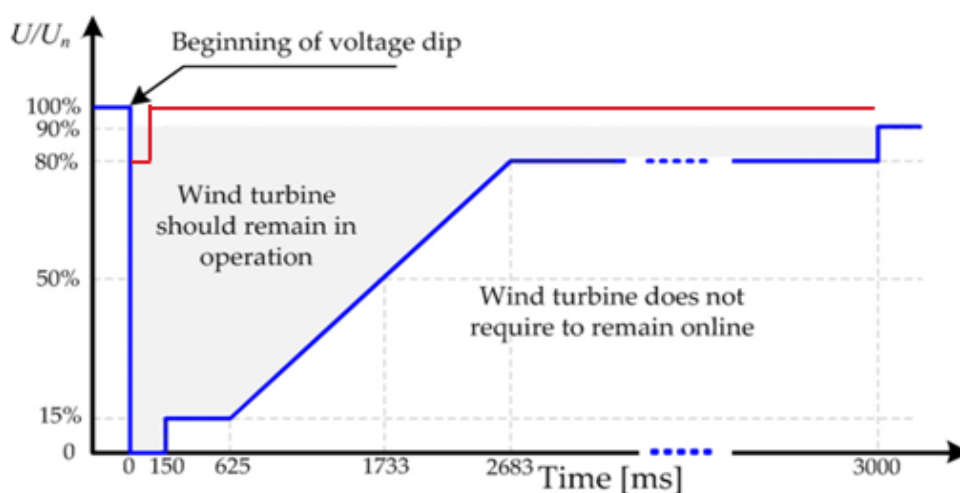
Η ανάπτυξη των τεχνολογιών ηλεκτρονικών ισχύος και ο σχεδιασμός των κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου επέτρεψαν στις μονάδες παραγωγής αιολικής ενέργειας να κατέχουν απόδοση συγκρίσιμη ή και μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών ή υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής. Ορισμένες εξειδικευμένες λειτουργικές δυνατότητες των αιολικών μονάδων παραγωγής καθώς και οι μέθοδοι για την υλοποίηση τους αναφέρονται παρακάτω. Οι περισσότερες από αυτές τις δυνατότητες μπορεί να επιτευχθούν και για τις φωτοβολταϊκές μονάδες δεδομένου ότι έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τις ανεμογεννήτριες, ειδικά αυτά που βασίζονται στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος.

- **Ρύθμιση και έλεγχος τάσης**

Η παροχή έργου ισχύος και ο έλεγχος του συντελεστή ισχύος μπορούν να παρέχονται είτε ενσωματωμένα, όπως διατίθεται στις Α/Γ τύπου 3 και 4, είτε μέσω συνδυασμού ελεγχόμενων πυκνωτών και τεχνολογιών ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς όπως ο στατικός αντισταθμιστής τάσης (Static Var Compensator SVC) και ο σύγχρονος στατικός αντισταθμιστής (Static Synchronous Compensator STATCOM).

- **Ικανότητα ανοχής σε σφάλματα**

Είναι αναγκαία η ύπαρξη της ικανότητας λειτουργίας μέσα σε συγκεκριμένες περιοχές τάσης καθώς και για συγκεκριμένη διάρκεια σε σφάλματα ή διαταραχές στο ΣΗΕ. Η ικανότητα ανοχής σε πτώση τάσης μπορεί να επιτευχθεί με όλες τις σύγχρονες μονάδες αιολικής ενέργειας κυρίως μέσω τροποποιήσεων των ελέγχων. Σε μερικές περιπτώσεις των παλαιότερων τύπων 1 και 2 ανεμογεννητριών, μπορεί να παρουσιαστεί ανάγκη για πρόσθετο εξοπλισμό μεταφοράς για βραχυκυκλώματα σε αδύναμους ζυγούς του συστήματος μεταφοράς.

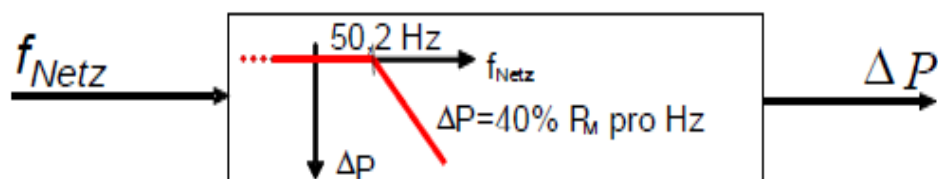


Εικόνα 4.1: Διάγραμμα βύθισης τάσης

Κάποιοι Διαχειριστές Συστημάτων απαιτούν ήδη οι μεγάλοι σταθμοί ΑΠΕ να παραμένουν συνδεδεμένοι με το δίκτυο κατά τη διάρκεια μεγάλων βυθίσεων τάσης.

- **Έλεγχος ενεργού ισχύος**

Αυτή η λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί για Α/Γ, με έλεγχο βήματος (pitch control) ή με ενεργό αεροδυναμικό έλεγχο (active stall control) ή με διακριτή ενεργοποίηση των μονάδων.



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα συχνότητας - μεταβολής ισχύος

Σύμφωνα με τη λογική του παραπάνω διαγράμματος έχουμε λειτουργία σταθμού ΑΠΕ για συχνότητα μικρότερη των 51.5 Hz και μεγαλύτερη των 47.5Hz. Άνω των 50.2 Hz επιβάλλεται γραμμική μείωση της παραγωγής με ρυθμό 40%P_{nom}/Hz ενώ όταν η συχνότητα αρχίσει να πέφτει κάτω των 50.2 Hz τότε επιβάλλεται μέγιστος ρυθμός αύξησης της ισχύος ίσος με 10%P_{nom}/min.

- **Έλεγχος συχνότητας**

Ο έλεγχος-ρύθμιση της συχνότητας μπορεί να υποστηριχθεί από όλες τις μονάδες που είναι εξοπλισμένες με κάποια μορφή ελέγχου βήματος (π.χ. έλεγχο βήματος ή ενεργό αεροδυναμικό έλεγχο).

- **Αδρανειακή απόκριση**

Η λειτουργία αυτή είναι συνυφασμένη με μονάδες τύπου 1 και 2 και μπορεί να επιτευχθεί μέσω συμπληρωματικού ελέγχου στο μετατροπέα ώστε να μιμηθούν την αδρανειακή συμπεριφορά των μονάδων τύπου 3 και 4.

- **Έλεγχος ρεύματος βραχυκύκλωσης**

Όλες οι γεννήτριες που βασίζονται σε μετατροπέα διαθέτουν ενσωματωμένη ικανότητα να περιορίζουν το ρεύμα σφάλματος σ' ένα επίπεδο που δεν υπερβαίνει το 150% του ρεύματος πλήρους φορτίου.

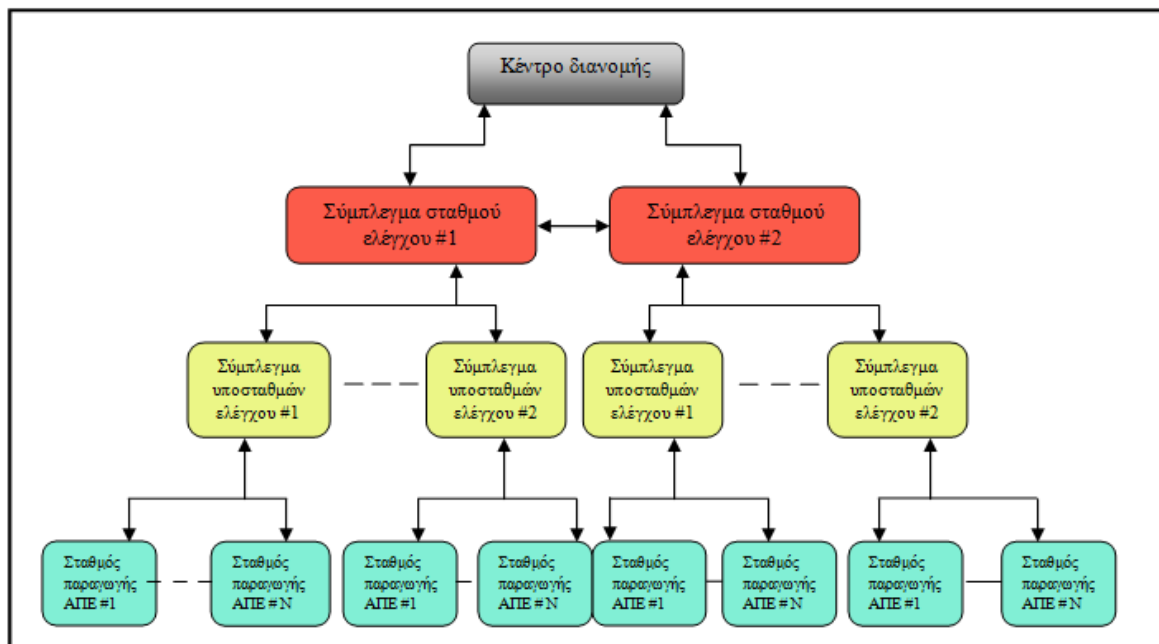
Ένας σταθμός παραγωγής από ΑΠΕ υποστηρίζεται από πολλά στοιχεία και συστήματα. Η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος, η ύπαρξη καταγραφικών μονάδων, τα συστήματα επικοινωνίας ελέγχου και δεδομένων καθώς και τα κατάλληλα σχεδιασμένα συστήματα προστασίας συμβάλλουν στη βελτίωση της πρόβλεψης, της δυνατότητας ελέγχου και αύξησης της δυνατότητας μεταφοράς στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.

4.2.3 Κεντρικός έλεγχος ενός συμπλέγματος μονάδων ΑΠΕ

Οι περιοχές με το καλύτερο δυναμικό ΑΠΕ μπορούν να εξελιχθούν σε κέντρα ΑΠΕ με πολλούς κοντινούς σταθμούς ανανεώσιμων πηγών.

Ο έλεγχος των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ΑΠΕ σ' ένα τέτοιο σύμπλεγμα πρέπει να είναι συντονισμένος για να αποφευχθούν τυχόν λειτουργικά προβλήματα. Λαμβάνοντας σαν παράδειγμα τον έλεγχο της άεργου ισχύος σε πολλαπλές εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας που έχει απαιτήσεις στην παροχή άεργου ισχύος και στον έλεγχο της τάσης του δικτύου, προκύπτουν προβλήματα όταν οι ελεγκτές της τάσης και της ισχύος σε κοντινές ανανεώσιμες μονάδες είναι ασύμβατες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον μη επαρκή έλεγχο τάσης και την ενεργοβόρα ροή άεργου ισχύος. Υπάρχουν πολλές αναφορές όπου ένας ή περισσότεροι σταθμοί παραγωγής έδιναν τη μέγιστη άεργο ισχύ ενώ οι γειτονικοί σταθμοί απορροφούσαν άεργο ισχύ. Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους καταστάσεις μια αποδοτική λύση είναι ο κεντρικός έλεγχος του συμπλέγματος.

Ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου ενός τέτοιου συμπλέγματος, διαμορφωμένο σε μία πολυστρωματική δομή όπως αυτή που απεικονίζεται παρακάτω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ρυθμίσει την ενεργό και την άεργο ισχύ ενός συμπλέγματος σταθμών ΑΠΕ.



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα διαμόρφωσης ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου

4.2.4 Βελτιώσεις στον τομέα μοντελοποίησης των μονάδων ΑΠΕ

Για την ακριβή αναπαράσταση της μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας των μεμονωμένων γεννητριών είτε ομάδων (Αιολικών Πάρκων Φωτοβολταϊκών Πάρκων κ.τ.λ) χρειάζονται τα κατάλληλα μοντέλα για κάθε είδος μονάδας ΑΠΕ.

Μέχρι σήμερα οι περισσότερες προσπάθειες για μοντελοποίηση των μονάδων ΑΠΕ έχουν γίνει σε επίπεδο γεννητριών. Αν και οι κατασκευαστές μονάδων ΑΠΕ έχουν αναπτύξει εδώ και καιρό και έχουν βελτιστοποιήσει μοντέλα για τη βελτίωση του σχεδιασμού των γεννητριών τους, (αυτά είναι συνήθως μοντέλα σχεδιασμένα σε κλειστού κώδικα εμπορικές πλατφόρμες λογισμικού) υπάρχουν και δημοσίως διαθέσιμα μοντέλα, παρόμοια με εκείνα που είναι διαθέσιμα για τις γεννήτριες της συμβατικής παραγωγής τα οποία είναι αναγκαία για τις μελέτες σχεδιασμού. Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί προς την κατεύθυνση ανάπτυξης μοντέλων από ομάδες εργασίας υπό την αιγίδα των WECC, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Utility Wing Intergration Group (UWIG) και North American Electric Reliability Corporation (NERC) με την ανάπτυξη και τη ελεύθερη διανομή γενικών δυναμικών μοντέλων για τις ανεμογεννήτριες του ίδιου τύπου ανεξαρτήτως του κατασκευαστή. Οι WECC και IEC κινούνται με σκοπό να τελειοποιήσουν και να πιστοποιήσουν αυτά τα μοντέλα γενικής χρήσης για τα οποία είναι απαραίτητη η συνεργασία μεταξύ των μηχανικών εφαρμογής και των κατασκευαστών ανεμογεννητριών. Έχουν γίνει προσπάθειες και για την ανάπτυξη γενικών μοντέλων για τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Όσον αφορά όμως τη μοντελοποίηση γενικότερα γεννητριών ΑΠΕ χρειάζεται ακόμα έρευνα εις βάθος. Όπως για παράδειγμα χρειάζεται πολύ μελέτη για να καθοριστεί η απόκριση διαφορετικών τύπων γεννητριών ΑΠΕ σε σφάλματα ώστε να μπορούν να αναπαρασταθούν τα πιο εξελιγμένα και ραγδαίως αναπτυσσόμενα χαρακτηριστικά ελέγχου της παραγωγής ΑΠΕ όπως αυτά που περιγράφονται στην παράγραφο 4.2.2.

Οι ομάδες IEEE και IEC εντίνουν τις προσπάθειες τους στη γενική δυναμική μοντελοποίηση για ολόκληρα αιολικά πάρκα, συμπεριλαμβανομένου του εξοπλισμού ελέγχου και εφεδρείας. Η μοντελοποίηση μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων είναι ιδιαίτερα δύσκολη λόγω του γεγονότος ότι μπορεί ένα αιολικό πάρκο να αποτελείται από δεκάδες ή ακόμα και εκατοντάδες μεμονωμένες γεννήτριες κατανεμημένες σε μια μεγάλη έκταση και λόγω της απαίτησης για αναπαράσταση τους ως ενιαία μονάδα παραγωγής σε προσομοίωση συστήματος παραγωγής για λόγους απλότητας. Χρειάζονται τεχνικές ισοδυνάμων μοντέλων για να συγκεντρωθούν τα

επιμέρους μοντέλα γεννητριών, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την χωρική και χρονική αλληλεπίδραση μεταξύ των γεννητριών. Κατάλληλα μοντέλα χρειάζονται επίσης για την αναπαράσταση όλων των καλωδίων που συνδέουν μεταξύ τους τις γεννήτριες ως ένα ενιαίο ισοδύναμο κύκλωμα. Επεκτείνοντας αυτό το μοντέλο σε μεγάλους τομείς αιολικών πάρκων, όπως είναι τα αιολικά πάρκα της κλίμακας των 10 GW στην Κίνα, θα είναι κάτι ακόμα πιο δύσκολο.

4.3 Βελτίωση ευελιξίας στη συμβατική παραγωγή

4.3.1 Ανάγκη για περισσότερη ευελιξία στη συμβατική παραγωγή

Αν και η ευελιξία του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ανταπόκρισης στη ζήτηση και της αποθήκευσης ενέργειας όπως και μέσω των ίδιων μονάδων ΑΠΕ, η επίτευξη μεγάλης κλίμακας και χαμηλού κόστους αποθήκευση είναι πολύ πιθανό να απαιτήσει δεκαετίες. Εξαιρέση αποτελούν τα υδροηλεκτρικά αντλιοστάσια. Η απόκριση στη ζήτηση ως ένας εύελικτος πόρος είναι ακόμα σε πρωταρχικό στάδιο. Η ευελιξία των συμβατικών μονάδων παραγωγής είναι λοιπόν η κύρια πηγή ευελιξίας ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάγκη για την αύξηση της είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση των απαιτήσεων που θέτει η διαλειπτόμενη παραγωγή των ΑΠΕ. Οι ανάγκες ευέλικτης παραγωγής διαφέρουν από χώρα σε χώρα και ανά περιοχή εξαιτίας των διαφορετικών πηγών ενέργειας που υπάρχουν σε κάθε τοποθεσία.

Γενικά οι υδροηλεκτρικές μονάδες με ταμιευτήρα είναι από τα πιο ευέλικτα συστήματα, ακολουθούν τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με υγρά καύσιμα, μετά αυτά που κάνουν καύση άνθρακα και τέλος τα πυρηνικά εργοστάσια. Πάντως είναι δύσκολο να μετρηθεί η ευελιξία έτσι ώστε να επιτραπεί η χρήση των αποτελεσμάτων στον προγραμματισμό της παραγωγής ενέργειας.

4.3.2 Αξιολόγηση ευέλικτης παραγωγής

Ευελιξία των συμβατικών σταθμών παραγωγής

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συμβάλλουν στη λειτουργική ευελιξία του συστήματος είναι ο κύκλος λειτουργίας, ο ρυθμός ανάληψης ισχύος καθώς και η δυνατότητα μερικής φόρτισης.

- **Ο κύκλος λειτουργίας** έχει να κάνει με το χρόνο και την ικανότητα της γεννήτριας για συχνή και γρήγορη εκκίνηση ή κλείσιμο.
- **Η δυνατότητα μεταβολής φορτίου** είναι ο ρυθμός με τον οποίο μια γεννήτρια μπορεί να μεταβάλλει την παραγωγή της.
- **Η δυνατότητα μερικής φόρτισης** είναι το ελάχιστο επίπεδο παραγωγής στο οποίο μπορεί μια γεννήτρια να λειτουργεί ομαλά και η αποδοτικότητά της όταν λειτουργεί σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος μικρότερα από την ονομαστική ικανότητα.

Εξαιτίας των διαφορών στο σχεδιασμό και την τεχνολογία, ο κάθε τύπος σταθμού παραγωγής έχει διαφορετικά επίπεδα λειτουργικής ευελιξίας που συνεπάγεται ποικίλες επιπτώσεις στην κατάσταση του εξοπλισμού, στη διάρκεια ζωής, στις λειτουργικές δαπάνες και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

- Οι **υδροηλεκτρικοί σταθμοί** με δεξαμενές έχουν πολύ ευέλικτη λειτουργία. Μπορούν να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους εύκολα και γρήγορα ή αντίστοιχα να σταματήσουν να λειτουργούν με μικρό αντίκτυπο στην υγεία του εξοπλισμού και τη διάρκεια ζωής του. Μπορούν να μεταβούν από την κατάσταση “εκτός λειτουργίας” στην κατάσταση πλήρους φόρτισης σε μερικά μόνο λεπτά και να αλλάξουν την παραγωγή τους σε κλάσματα του ενός λεπτού. Η ελάχιστη παραγωγή τους μπορεί να είναι πολύ χαμηλή, πράγμα που σημαίνει ότι έχουν εύρος ρύθμισης κοντά στο 100%. Ωστόσο η παραγωγή και ως εκ τούτου η συμβολή των υδροηλεκτρικών σταθμών στην ευελιξία του συστήματος μπορεί να επηρεαστεί από εποχιακούς παράγοντες όπως η ξηρασία οι πλημμύρες και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες.
- Οι **σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φυσικό αέριο** συμπεριλαμβάνουν σταθμούς αεριοστρόβιλων συνδυασμένου κύκλου (Natural Gas Combined Cycle) και απλού κύκλου (Simple Cycle Gas Turbine) και είναι επίσης ευέλικτοι πόροι παραγωγής. Οι υπάρχοντες τεχνολογίες των αεριοστρόβιλων απλού κύκλου είναι σε θέση να αλλάζουν την παραγωγή με ρυθμό μέχρι 100 MW – 150 MW σε 10 λεπτά και οι αεριοστρόβιλοι συνδυασμένου κύκλου (NGCC) σε 60 έως 80 λεπτά. Υπάρχουν νέες τεχνολογίες NGCC με αυξημένη έμφαση στην ικανότητα να λειτουργούν σε ένα σύστημα με ένα μεγάλο ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και αναμένεται να μπορούν να μεταβάλουν την παραγωγή τους κατά 150 MW σε 10 λεπτά και να φτάνουν στο πλήρες φορτίο σε 30 λεπτά. Το ποσοστό μεταβολής της παραγωγής τους είναι γενικά μέχρι 8% ανά λεπτό. Οι NGCC μονάδες μπορούν να μειώσουν την παραγωγή τους κατά 80% της χωρητικότητας τους σχετικά εύκολα.
- Οι **Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα** έχουν περιορισμένη λειτουργική ευελιξία καθώς δεν είναι κατάλληλοι για συχνές διακοπές και επανεκκινήσεις δεδομένου ότι μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες η επανέναρξη τους ή το κλείσιμο τους. Η δυνατότητα μεταβολής του φορτίου τους, φτάνει μόνο το 1% -3% ανά λεπτό. Κάποιες καινούριες γεννήτριες μεγάλης

ονομαστικής ικανότητας μπορούν να φτάσουν το 5% ανά λεπτό. Μερικές καινούριες γεννήτριες μεγάλης ονομαστικής ισχύος ή κάποιες γεννήτριες που είναι ειδικά σχεδιασμένες να φτάνουν στη μέγιστη απόδοση μπορούν να φτάσουν την ελάχιστη παραγωγή τους στο 50% ή και χαμηλότερα, αλλά η χαμηλότερη παραγωγή θα οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση καυσίμου ανά παραγόμενη κιλοβατώρα. Ένα παράδειγμα δίνεται στον επόμενο πίνακα, όπου η ευελιξία των συγκεκριμένων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα μπορεί να επηρεάζεται από το μέγεθος, την ηλικία, την ποιότητα των καυσίμων και τα εγκατεστημένα συστήματα ελέγχου.

Επίπεδο φόρτισης (% ονομαστικής δυναμικότητας)	Πρότυπο κατανάλωσης άνθρακα (g/kWh)	
	1000MW ultra-supercritical generators	600MW ultra-supercritical generators
40%	306	311
50%	298	303
75%	287	290
100%	282	284

Εικόνα 4.4: Τυπική κατανάλωση άνθρακα των γεννητριών 600MW και 1000MW σε διαφορετικά επίπεδα φόρτισης

- Τα **εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας** έχουν επίσης περιορισμένη λειτουργική ευελιξία καθώς το κλείσιμο και η επανεκκίνηση τους αποφεύγεται για οικονομικούς λόγους. Σχετικά νέοι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να μειώσουν την παραγωγή στο 20% της συνολικής παραγωγής τους για 1 ώρα αλλά απαιτούν 6 έως 8 ώρες για να φτάσουν πάλι στο πλήρες φορτίο. Παρά το γεγονός ότι το λειτουργικό κόστος για τα πυρηνικά εργοστάσια σε λειτουργία με μερικό φορτίο δεν διαφέρει σημαντικά από ότι όταν λειτουργούν με πλήρες φορτίο, χρειάζονται να λειτουργήσουν ως μονάδες βάσης σε υψηλά επίπεδα παραγωγής ώστε να ανακτηθεί το υψηλό κόστος επένδυσης.

Με την ενσωμάτωση της μεγάλης παραγωγής από ΑΠΕ στο ΣΗΕ, τα ευέλικτα υδροηλεκτρικά και τα εργοστάσια υγρών καυσίμων πρέπει να ρυθμίζουν πιο συχνά την παραγωγή τους. Τα πυρηνικά εργοστάσια και οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα παραδοσιακά δούλευαν κυρίως ως μονάδες βασικού φορτίου αλλά

τώρα αρχίζουν να κινούνται σε πιο ευέλικτα μοντέλα λειτουργίας. Χρειάζεται μεγάλη προσπάθεια για να γίνει αντιληπτός ο αντίκτυπος της ευέλικτης λειτουργίας στην τεχνική, οικονομική και περιβαλλοντική απόδοση των συμβατικών μονάδων παραγωγής έτσι ώστε να επιτευχθεί βελτίωση στον σχεδιασμό του εξοπλισμού. Τέλος, χρειάζονται αναβαθμίσεις των ήδη υπαρχόντων υλικών και προσχεδιασμός των απαραίτητων οικονομικών κινήτρων.

Μέτρηση ευελιξίας παραγωγής

Προς το παρόν, υπάρχει έλλειψη μεθόδων και εργαλείων για τη μέτρηση της ευελιξίας. Η έλλειψη αυτή οδηγεί στη βελτιστοποίηση των πόρων παραγωγής ώστε να παρέχουν την απαραίτητη ελαστικότητα με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Γενικά, είναι πολύ πιο δύσκολο να μετρηθεί η ευελιξία της παραγωγής από το να μετρηθεί η επάρκεια της παραγόμενης ισχύος. Η μέτρηση της ευελιξίας είναι πιο περίπλοκη και απαιτεί περισσότερα δεδομένα και λεπτομερή μοντελοποίηση. Οι φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου και της ερευνητικής κοινότητας, πρέπει να κάνουν προσπάθειες για την ανάπτυξη πιο αυστηρών μεθόδων και εργαλείων που θα υπολογίζουν με ακρίβεια την ποσοτικοποίηση και αξιολόγηση του βαθμού της ευελιξίας σε ένα δεδομένο σύστημα παραγωγής, για ένα δεδομένο επίπεδο διεύθυνσης των ΑΠΕ.

Η ερευνητική κοινότητα έχει αρχίσει να ανταποκρίνεται στις ανάγκες μέτρησης της ευελιξίας του συστήματος παραγωγής. Η έμφαση δίνεται στην ευελιξία της παραγωγής, που προς το παρόν είναι η κύρια πηγή ευελιξίας αλλά οι προσπάθειες λαμβάνουν υπόψη την απόκριση της ζήτησης και τη χρήση της αποθήκευσης ενέργειας για την επίτευξη μεγαλύτερης ευελιξίας. Η ομάδα εργασίας Integration of Variable Generation Task Force (IVGTF) υπό την επίβλεψη της NERC κυκλοφόρησε το 2010 μια ειδική έκθεση σχετικά με τις απαιτήσεις ενός ευέλικτου δικτύου και σχετικά με τις μετρήσεις ικανότητας μεταβλητής παραγωγής και επίσης αναφέρεται στις μετρήσεις και προσεγγίσεις για την επίτευξη της ευελιξίας του συστήματος. Η GIVAR έχει προτείνει μια ημί-ποσοτική μέθοδο που στηρίζεται στην ποιοτική περιγραφή περιορισμών στην αξιολόγηση της ευελιξίας. Αναμένεται και επακόλουθο έργο με στόχο την ποσοτικοποίηση της ευελιξίας ενός SHE. Η AESO έχει αποφασίσει την ανάπτυξη ενός εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων ενσωματώνοντας την πρόβλεψη της αιολικής ενέργειας, για τη μέτρηση της ευελιξίας του συστήματος ώστε να βοηθήσει τους φορείς εκμετάλλευσης του συστήματος ώστε να διαχειριστούν την αυξημένη μεταβλητότητα και αβεβαιότητα.

4.3.3 Προγραμματισμός παραγωγής για επάρκεια ισχύος και ευελιξία

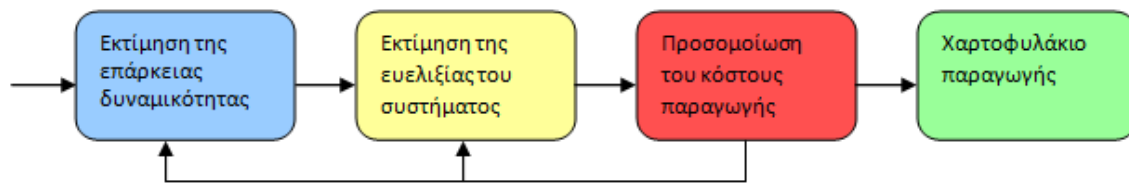
Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη αβεβαιότητα και μεταβλητότητα στην παραγωγή, που οφείλεται στην ενσωμάτωση μεγάλης κλίμακας ΑΠΕ γίνεται ολοένα και πιο σημαντική στη διαδικασία του σχεδιασμού της παραγωγής όχι μόνο η επάρκεια της παραγόμενης ισχύος αλλά και η επάρκεια στην ευελιξία. Εξασφαλίζοντας απλά ένα συγκεκριμένο αριθμό MW ισχύος αυτό δε θα είναι αρκετό για την ασφάλεια του συστήματος, αν αυτή η ικανότητα παραγωγής δεν είναι τόσο ευέλικτη ώστε να ανταποκρίνεται στις μεταβολές του φορτίου του συστήματος.

Σχεδιασμός για την επάρκεια ισχύος

Για τον προγραμματισμό της παραγωγής, έχει αναγνωριστεί ως ένα σημαντικό θέμα ο υπολογισμός της εφεδρείας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η δυναμική στρεφόμενη εφεδρεία ενός είδους παραγωγής μπορεί να οριστεί ως η ποσότητα του επιπλέον φορτίου το οποίο μπορεί να εξυπηρετηθεί λόγω της προσθήκης της, διατηρώντας παράλληλα τα υφιστάμενα επίπεδα αξιοπιστίας. Ο υπολογισμός της στρεφόμενης εφεδρείας λόγω των ΑΠΕ είναι πολύ πιο δύσκολος από ότι στη συμβατική παραγωγή λόγω της εγγενούς μεταβλητότητας και αβεβαιότητας στην παροχή ισχύος. Τόσο η Power Engineering Society (PES) και η NERC IVGTF έχουν οργανώσει ομάδες εργασίας για να μελετήσουν το θέμα. Μια αυστηρή μέθοδος που αφορά την “αποτελεσματική ικανότητα μεταφοράς φορτίου (ELCC)” βασίζεται στην αξιοπιστία της προσομοίωσης. Έχουν επίσης προταθεί αρκετές προσεγγιστικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της δυναμικότητας της αιολικής ενέργειας και εν συνεχεία της ηλιακής ενέργειας. Ωστόσο εξακολουθεί να υπάρχει ένας αριθμός προβλημάτων συμπεριλαμβανομένης της αναπαράστασης των άλλων τύπων παραγωγής από ΑΠΕ.

Προγραμματισμός παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη την ευελιξία σε επίπεδο του συστήματος

Προκειμένου να εξεταστούν οι απαιτήσεις σε ευελιξία χρειάζεται ένα καινούριο πρότυπο σχεδιασμού. Ένα παράδειγμα είναι η προσέγγιση στο διάγραμμα που ακολουθεί, προσθέτοντας ένα στάδιο αξιολόγησης ευελιξίας στη διαδικασία σχεδιασμού του συστήματος παραγωγής.



Εικόνα 4.5: Διαδικασία σχεδιασμού παραγωγής που ενσωματώνει αξιολόγηση και ευελιξία.

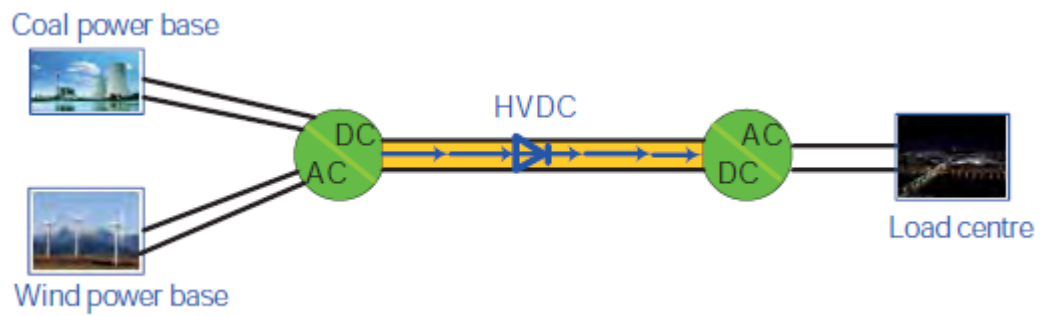
Η διαδικασία αρχίζει από την σχετικά απλή εκτίμηση της επάρκειας παραγόμενης ισχύος, χρησιμοποιώντας μετρήσεις όπως η απώλεια του προσδοκώμενου φορτίου για να σχηματιστεί ένα αρχικό χαρτοφυλάκιο και στη συνέχεια κινείται προς τα στάδια του συστήματος δεδομένων αξιολόγησης ευελιξίας και της προσομοίωσης του κόστους παραγωγής. Και τα δύο αυτά στάδια περιλαμβάνουν συστηματικές μετρήσεις δεσμευμένων μονάδων και οικονομικές μελέτες. Αυτή η προσέγγιση των τριών σταδίων έχει σχεδιαστεί για να αντικατοπτρίζει όλους τους στόχους της διαδικασίας σχεδιασμού και ταυτόχρονα να παρέχει ένα ελάχιστου κόστους σύστημα παραγωγής για τη δεδομένη περίοδο της μελέτης. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί υπερβολική ανεπάρκεια ευελιξίας, το χαρτοφυλάκιο παραγωγής ή το μοντέλο δεσμευμένων μονάδων μπορεί να μεταβληθεί και όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται προκειμένου να βρεθεί ένα καλύτερο χαρτοφυλάκιο παραγωγής που πληροί τους διπλούς στόχους της ελαχιστοποίησης κόστους και της επίτευξης ενός συγκεκριμένου προτύπου ευελιξίας. Τονίζεται πάλι ότι η εκτίμηση της ευελιξίας του συστήματος είναι δυνατή μόνο όταν είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις της ευελιξίας στα πλαίσια του σχεδιασμού, κάτι το οποίο προς το παρόν δε συμβαίνει.

Σχεδιασμός παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη την ευελιξία ανά περιοχή των ενεργειακών πόρων

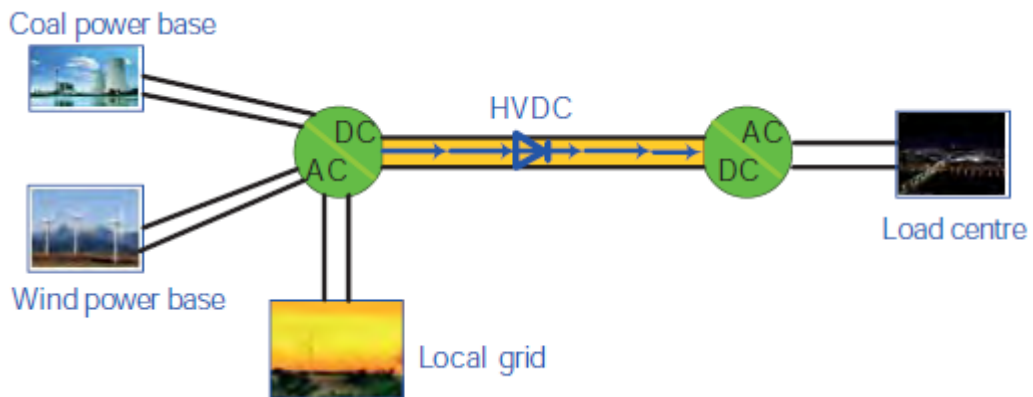
Εκτός από την ενσωμάτωση των εκτιμήσεων της ευελιξίας στο σχεδιασμό παραγωγής σε επίπεδο συστήματος μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ειδικά σχέδια σε επίπεδο παροχής πόρων για να εκμεταλλευτούν την ευελιξία της συμβατικής παραγωγής, προκειμένου να αντισταθμιστεί η μεταβλητότητα της παραγωγής των ΑΠΕ.

Μονάδες παραγωγής με καύση άνθρακα (λιγνιτικές) μπορούν να εγκατασταθούν κοντά σε αιολικά πάρκα στο ίδιο το δίκτυο μεταφοράς. Οι διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής ενέργειας μπορούν να εξομαλυνθούν με την προσαρμογή της καύσης άνθρακα και έτσι το σύστημα μεταφοράς να μπορεί να βελτιωθεί σε σύγκριση με τη μεταφορά μόνο της

αιολικής ενέργειας και επίσης είναι δυνατή η μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 4.6: “Wind-fire bundling” design with HVDC transmission



Εικόνα 4.7: Συνεκμετάλευση αιολικής ενέργειας και ενέργειας απο λιγνίτη

4.4 Επέκταση συστήματος μεταφοράς

4.4.1 Ανάγκες για την επέκταση ενός συστήματος μεταφοράς

Η ένταξη μεγάλης κλίμακας παραγωγής μέσω ΑΠΕ χρειάζεται και μεγάλης κλίμακας επέκταση και ενίσχυση του συστήματος μεταφοράς για τους ακόλουθους λόγους:

- Για τη μεταφορά της ενέργειας που παράγεται από μεγάλης κλίμακας μονάδες ΑΠΕ απαιτείται η επέκταση του συστήματος και η διαπεριφερειακή σύνδεση καθώς οι ανανεώσιμοι πόροι βρίσκονται συνήθως μακριά από τα μεγάλα φορτία (υποσταθμοί-πόλεις) και από το υπάρχον δίκτυο.
- Μέσω της επέκτασης του δικτύου η ομοιόμορφη γεωγραφική κατανομή των ΑΠΕ μπορεί να εξομαλύνει τη συγκεντρωτική τους κυμαινόμενη και μη εγγυημένη ισχύ και έτσι να μειωθεί το αναμενόμενο σφάλμα στην πρόβλεψη της παροχής ισχύος από τις ΑΠΕ.
- Η επέκταση του δικτύου και η ενίσχυση του μπορεί να υποστηρίξει τη διασύνδεση μεταξύ διαφορετικών περιοχών και ως εκ τούτου να διευκολύνει τη συνεργασία τους ή να τις ενοποιήσει για να μοιράζονται την ευέλικτη παραγωγή.

Ο τρόπος μεταφοράς ενέργειας από ΑΠΕ είναι ένα ζήτημα που υπάρχει παντού και για τεχνικούς και για ρυθμιστικούς λόγους. Αδυναμία στην επίλυση του προβλήματος θα θέσει σε κίνδυνο την επίτευξη των στόχων ΑΠΕ και θα ανεβάσει το κόστος για την αξιόπιστη ενσωμάτωση των νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ΣΗΕ.

4.4.2 Εφαρμογή των νέων τεχνολογιών μεταφοράς

Μεταφορά σε υψηλότερα επίπεδα τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (UHVAC)

Οι γραμμές μεταφοράς UHVAC με ονομαστική τάση 1150kV ή 1000kV κατασκευάστηκαν και τέθηκαν σε λειτουργία από την πρώην Σοβιετική Ένωση και την Ιαπωνία στη δεκαετία 1980 -1990 αλλά στη συνέχεια για πρακτικούς λόγους λειτούργησαν σε τάση 500kV. Η Κίνα οδηγείται σε έρευνα και εφαρμογή γραμμών μεταφοράς των 1000kV, το οποίο φαίνεται να είναι μια επιθυμητή τεχνολογία για την ικανοποίηση της ανάγκης μεταφοράς ισχύος σε μεγάλης κλίμακας αποστάσεις από μονάδες καύσης άνθρακα και μονάδες υδροηλεκτρικής, αιολικής και ηλιακής ενέργειας στις βορειοδυτικές περιοχές μέχρι τις κεντρικές και ανατολικές περιοχές με τεράστια και ταχέως αυξανόμενη

ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη δοκιμή τεχνολογίας UHVAC απόστασης 640 km, απλού κυκλώματος έγινε το 2009. Η ενίσχυση που ακολουθήθηκε ολοκληρώθηκε στα τέλη του 2011 και τώρα μπορούν να μεταφέρονται διαρκώς 5000 MW ενέργειας. Έχουν γίνει σχέδια για UHVAC που θα αποτελούν μέρος της μεγάλης δυναμικότητας και μεγάλων αποστάσεων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα της Δύσης (Εσωτερική Μογγολία) και της Βόρειας Κίνας. Η τεχνολογία UHVAC έχει επίσης προσελκύσει την προσοχή άλλων αναδυόμενων οικονομιών που αντιμετωπίζουν παρόμοιες προκλήσεις παροχής ενέργειας όπως αυτή της Ινδίας.

Ένα απλό κύκλωμα με γραμμή 1000 kV εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να μεταφέρει 400-500MW σε μια απόσταση των 1000 με 1500 χιλιομέτρων. Σε σύγκριση με τις γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος των 500kV οι γραμμές των 1000kV έχουν πολλά πλεονεκτήματα στη βελτίωση της ικανότητας μεταφοράς και στην απόσταση αφού μειώνουν την απώλεια ενέργειας και έτσι εξοικονομούν κόστος. Για τη μεταφορά ενέργειας από ΑΠΕ η τεχνολογία UHVAC είναι κυρίως κατάλληλη για τη μεταφορά ισχύος από τις χερσαίες εγκαταστάσεις ΑΠΕ που χρησιμοποιούν εναέριες γραμμές.

Τεχνολογίες για πιο ευέλικτη μεταφορά εναλλασσόμενου ρεύματος (FACTS)

Για τη βελτίωση της ικανότητας, της ευστάθειας και της ευελιξίας μεταφοράς του εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός FACTS (Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς) καθιστώντας τη μεταφορά ενέργειας από ΑΠΕ πιο ικανή. Για παράδειγμα η τεχνολογία thyristor controlled series compensators (TCSCs) μπορεί να εφαρμοστεί σε γραμμές μεταφοράς για να μειώσει την επαγωγική αντίδραση των γραμμών, να αυξήσει την απόσβεση και να μετριάσει τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. FACTS όπως τα SVC, STATCOM και τα εγκάρσια πηνία μπορούν να εγκατασταθούν παράλληλα σε ζυγούς στους υποσταθμούς για να συντελέσουν στην αντιστάθμιση άεργου ισχύος και τα προβλήματα ελέγχου τάσης τα οποία προέρχονται από την διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο, εξαιτίας των διακυμάνσεων της παραγωγής τους. Τα SVCs και STATCOMs μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της απόδοσης των σταθμών παραγωγής ΑΠΕ για να καλύψουν τις απαιτήσεις της άεργου ισχύος και για τον έλεγχο της τάσης διατηρώντας παράλληλα όσο το δυνατό πιο απλό το σχεδιασμό των γεννητριών ΑΠΕ.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι μεγάλες διακυμάνσεις της αιολικής ισχύς θα προκαλέσουν μεγάλες διακυμάνσεις και στην τάση σε όλο το δίκτυο ειδικά στους κόμβους στην κύρια γραμμή μεταφοράς ισχύος. Για τη σταθεροποίηση της τάσης πρέπει να ενεργοποιούνται

συχνά πολλές συσκευές ρύθμισης τάσης μ' ένα καλά συντονισμένο τρόπο το οποίο είναι επιβλαβές για τον εξοπλισμό και είναι δύσκολο στο χειρισμό.

Μεταφορά υψηλότερων επιπέδων τάσεως συνεχούς ρεύματος (UHVDC)

Η τεχνολογία CSC-HVDC είναι μια τεχνολογία συμβατικής μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης, που είναι σχετικά ανεπτυγμένη και έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά για μεγάλες αποστάσεις, μεγάλης δυναμικότητας μεταφορά ενέργειας χωρίς πτώση τάσης καθώς και για τη σύνδεση ασύγχρονων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Σε σύγκριση με τη μεταφορά εναλλασσόμενου ρεύματος έχει πλεονεκτήματα όπως είναι η χαμηλότερες απώλειες, χαμηλότερο κόστος γραμμών, και η δυνατότητα γρήγορου ελέγχου της ισχύος. Όπως και η μετάδοση εναλλασσόμενου ρεύματος έτσι και η μετάφορά συνεχούς ρεύματος οδεύει προς την κατεύθυνση των υπερυψηλών επιπέδων τάσης για μεγαλύτερη δυναμικότητα και μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Ωστόσο υπάρχουν ακόμα προβλήματα στη χρήση των CSC-HVDC ή UHVDC για τη μεταφορά ενέργειας από ΑΠΕ. Για παράδειγμα όταν οι γραμμές μεταφοράς HVDC χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση μόνο αιολικής ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης το πρόβλημα δεν είναι μόνο το χαμηλό ποσοστό χρησιμοποίησης αλλά και η ελάχιστη ισχύς εκκίνησης στις γραμμές συνεχούς ρεύματος καθώς και τα προβλήματα στη σταθερότητα της συχνότητας και της τάσης που απαιτούν περισσότερη έρευνα.

Ο σχεδιασμός “wind-fire bundling” (συνδυασμός παραγωγής από αιολικά και θερμικές μονάδες) μπορεί να αντέξει σε κοινές διαταραχές ανέμου αλλά αν η ταχύτητα ανέμου αλλάζει γρήγορα η συχνότητα είναι δύσκολο να ελεγχθεί χωρίς ισχυρή στήριξη της τάσης. Οι διακοπές στην αρχή της γραμμής μπορεί να οδηγήσουν σε κατάρρευση της τάσης και σε αποσύνδεση των ανεμογεννητριών ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των εργοστασίων καύσης άνθρακα και των αιολικών πάρκων.

Με τη στήριξη της τάσης από το τοπικό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, τα προβλήματα σταθερότητας μπορεί να μετριαστούν αλλά θα πρέπει να δοθεί προσοχή στις επιπτώσεις της διακύμανσης της αιολικής ενέργειας στο τοπικό δίκτυο.

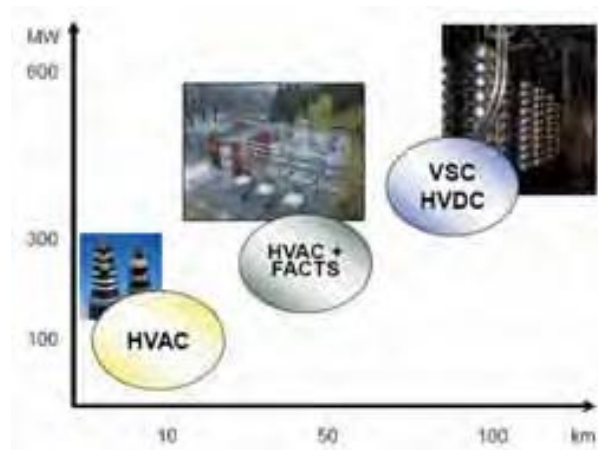
Πιο ευέλικτη μεταφορά συνεχούς ρεύματος (VSC-HVDC to MTDC and DC grids)

Η μεταφορά με VSC-HVDC έχει κάποια πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα CSC-HVDC που την κάνουν όχι μόνο πιο κατάλληλη για την ένταξη των ΑΠΕ στο δίκτυο αλλά και πιο βολική για το σχηματισμό πολυτερματικού DC (MTDC) συστήματος. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι τα εξής:

- Μπορεί να ελέγξει γρήγορα τόσο την ενεργό όσο και την άεργο ισχύ, ανεξάρτητα της ονομαστικής ικονότητας της σε MVA. Αυτό δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς πολύ χαμηλής έως μηδενικής ενεργού ισχύος, χαρακτηριστικό το οποίο είναι κατάλληλο για τη συχνή και μεγάλου φάσματος διακύμανση της παραγωγής μέσω ΑΠΕ, ενώ η CSC-HVDC περιορίζεται από την ελάχιστη ισχύ που απαιτείται για την επανεκκίνηση. Οι σταθμοί VSC-HVDC μπορούν να παράγουν ή να απορροφούν μια δεδομένη ποσότητα άεργου ισχύος σύμφωνα με ρυθμίσεις ή ανάλογα με το επίπεδο της τάσης του συνδεδεμένου AC δικτύου, παρέχοντας υποστήριξη τάσης, ενώ οι σταθμοί CSC-HVDC συνέχεια απορροφούν μεγάλες ποσότητες άεργου ισχύος κατά τη λειτουργία τους .
- Έχει τη δυνατότητα να αντιστρέφει γρήγορα την κατεύθυνση της άεργου ισχύος χωρίς να αλλάζει την απαιτούμενη από το CSC-HVDC πολικότητα της τάσης. Έτσι δεν χρειάζεται αλλαγές στην τοπολογία και τη στρατηγική του μετατροπέα του συστήματος ελέγχου.
- Επίσης δεν απαιτεί υποστήριξη από το δίκτυο για τη μετάβαση των θυρίστορ όπως απαιτείται στη CSC-HVDC και ως εκ τούτου μπορεί να συνδεθεί με αδύναμα ή ακόμα και παθητικά δίκτυα σε αντίθεση με το CSC-HVDC που απαιτεί το δίκτυο AC που θα συνδεθεί να είναι αρκετά ισχυρό.

Τρεις ή περισσότεροι σταθμοί μετατροπής συνδέονται μεταξύ τους με γραμμές συνεχούς ρεύματος και ο καθένας αλληλεπιδρά με ένα δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Έτσι διευκολύνεται η ευέλικτη σύνδεση μεταξύ των δικτύων ακόμα και με δίκτυα συνεχούς ρεύματος. Αυτό θα διευκολύνει τη μελλοντική ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ΣΗΕ όπου διαφορετικές πηγές ενέργειας θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους.

Η προτίμηση της τεχνολογίας VSC-HVDC για την ενσωμάτωση υπεράκτιων αιολικών πάρκων σχετικά μεγάλης απόστασης απο το σημείο διασύνδεσης φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα.



Εικόνα 4.8 : Τεχνολογίες μεταφοράς για την ενσωμάτωση υπεράκτιας αιολικής ενέργειας

Είναι ξεκάθαρο ότι για κοντινές αποστάσεις και σχετικά χαμηλής ισχύος εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης η τεχνολογία HVAC είναι αρκετή. Όσο η ενέργεια και η απόσταση αυξάνονται η τεχνολογία HVAC θα πρέπει να ενισχυθεί με συσκευές FACTS προκειμένου να αντισταθμίσει τις απώλειες και να παρέχει σταθερότητα στο δίκτυο. Προκειμένου να συνδεθούν απομακρυσμένα παράκτια Αιολικά Πάρκα σ' ένα δίκτυο προτιμώνται οι τεχνολογίες VSC-HVDC.

Για την αξιοποίηση μεγάλων ποσοτήτων αιολικής ενέργειας, όπως στητη Βόρεια Θάλασσα, προτείνεται ένα παράκτιο δίκτυο βασισμένο στην πολυτεματική τεχνολογία VSC-HVDC. Ένα δοκιμαστικό συγκριτικό σύστημα προσομοίωσης έχει αναπτυχθεί για τη διεξαγωγή λεπτομερών ερευνών σε λειτουργικά ζητήματα. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι είναι απαραίτητο να γίνεται εκτεταμένος συντονισμός στα συστήματα ελέγχου τόσο για την αποφυγή ανεπιθύμητων κυκλικών ροών DC ισχύος όσο και για την εύρεση του βέλτιστου ζυγού ταλάντωσης στο σύστημα το οποίο επίσης εξαρτάται από τις επιλογές-παραδοχές που έγιναν.

Μέχρι σήμερα η τεχνολογία VSC-HVDC δεν έχει φτάσει στο επίπεδο των υψηλών τάσεων και της δυναμικότητας όπως έχει η CSC-HVDC. Επίσης, οι σταθμοί VSC-HVDC υποφέρουν από υψηλότερες απώλειες ισχύος. Τα συστήματα μεταφοράς VSC-HVDC με επίπεδα τάσεως μικρότερα από 150 kV και δυναμικότητα μικρότερη από 200MW είναι σχετικά ώριμες τεχνολογίες. Τα έργα μεταφοράς με αυτή την τεχνολογία και επίπεδα τάσης από 350kV και δυναμικότητα από 400 MW έχουν ήδη ξεκινήσει αλλά εξακολουθούν να είναι πολύ μικρότερα από ότι τα τελευταία έργα των 800kV, 6400MW CSC-HVDC. Η απώλεια ισχύος σ' ένα μετατροπέα VSC-HVDC είναι τυπικά 1%-6% που προς το παρόν είναι πολύ υψηλότερο ποσοστό σε σχέση με την απώλεια του μετατροπέα

CSC-HVDC που φτάνει το 0.5%-1%. Οι εγκαταστάσεις VSC-HVDC χρησιμοποιούν κυρίως καλώδια ως μέσο μεταφοράς. Ένα από τα όρια που επιβάλλονται για την ικανότητα μεταφοράς ισχύος αυτών των εγκαταστάσεων έγκειται στην αντοχή των καλωδίων ισχύος DC. Κατά κύριο λόγο τα καλώδια που χρησιμοποιούνται είναι DC αλλά δεν είναι και η μόνη επιλογή για υπεράκτιες VSC-HVDC συνδέσεις. Ωστόσο με την επιλογή των εναέριων γραμμών για τεχνολογία VSC-HVDC, τα επίπεδα ισχύος μπορεί να αυξηθούν καθώς η τεχνολογία VSC εξελίσσεται. Τέλος δεδομένου ότι τα περισσότερα έργα VSC-HVDC έχουν τεθεί σε λειτουργία εδώ και λίγα χρόνια, η συνολική μακροπρόθεσμη ασφάλεια και αξιοπιστία των VSC-HVDC παραμένει να αποδειχθεί με την πάροδο του χρόνου, όπως συμβαίνει και σε κάθε νέο τύπο τεχνολογίας.

4.4.3 Εξελίξεις στο σχεδιασμό συστημάτων μεταφοράς

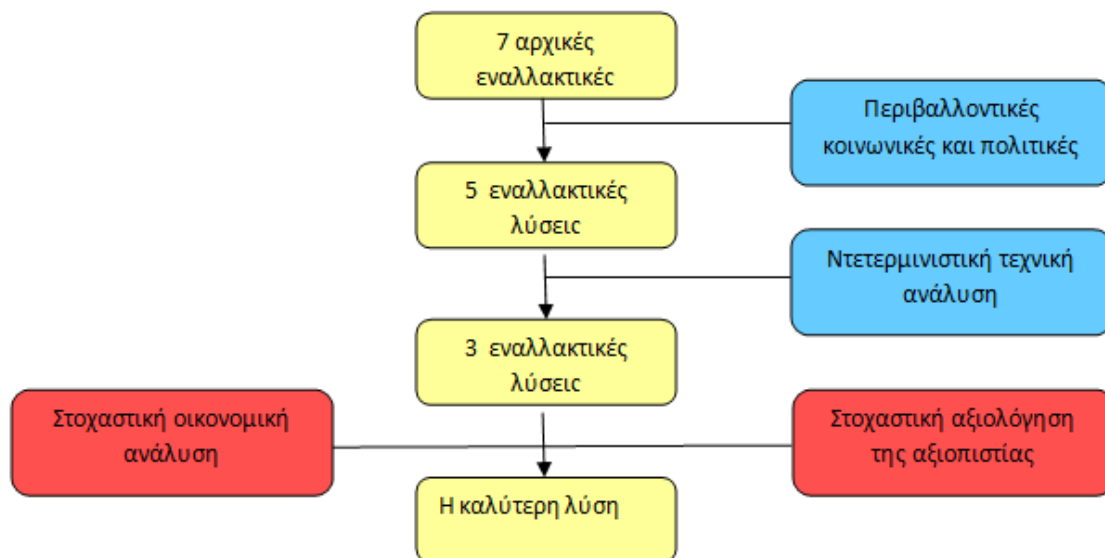
Η τρέχουσα πρακτική στο σχεδιασμό δικτύου μεταφοράς

Μέχρι σήμερα οι μέθοδοι σχεδιασμού συστημάτων μεταφοράς βασίζονται στην κρίση των εμπειρογνομόνων και σε ντετερμινιστικές προσομοιώσεις βασισμένες σε μαθηματικά μοντέλα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και των επιμέρους στοιχείων του. Σύμφωνα με ένα σενάριο πρόβλεψης φορτίου και προγραμματισμού παραγωγής μελετώνται εναλλακτικές μέθοδοι μεταφοράς, αρχικά με το σχεδιασμό από ειδικούς και μετά με την εκτέλεση εκτεταμένων προσομοιώσεων που συμπεριλαμβάνουν τη ροή φορτίου, μελέτες ευστάθειας και βραχυκυκλώματος σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αλλά και σε μεταβατικές καταστάσεις, προκειμένου να εξακριβωθεί αν μπορούν να καλύψουν τα ντετερμινιστικά κριτήρια σχεδιασμού. Για τεχνικά βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις, μπορούν να πραγματοποιηθούν οικονομικές συγκρίσεις ώστε να βρεθεί η καλύτερη. Σε μερικές περιπτώσεις εξαιτίας της αβεβαιότητας λαμβάνονται υπόψη πολλά σενάρια πρόβλεψης φορτίου και χαρτοφυλακίου παραγωγής τα οποία μπορεί να θεωρηθούν ως η λεγόμενη ‘ανάλυση ευαισθησίας’ ή ‘σεναριακή μέθοδος’.

Στοχαστική σχεδίαση συστημάτων μεταφοράς

Η ανάγκη για στοχαστικό σχεδιασμό στα δίκτυα μεταφοράς έχει αναγνωριστεί στην ερευνητική και βιομηχανική κοινότητα, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ντετερμινιστικές μέθοδοι σχεδιασμού μπορεί να μην είναι σε θέση να αντικατοπτρίσουν την πιθανότητα διακοπής και τις παραμέτρους του συστήματος και ότι το ευρέως χρησιμοποιούμενο κριτήριο ασφαλείας N-1, μπορεί να είναι ανεπαρκές για να συλλάβει την πραγματικά χειρότερη περίπτωση. Καθώς υπάρχει διαχωρισμός παραγωγής και μεταφοράς στα πλαίσια της απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ο ντετερμινιστικός σχεδιασμός μετάδοσης είναι πια λιγότερο σημαντικός εξαιτίας της αυξανόμενης αβεβαιότητας που δημιουργείται από τη μεγάλης κλίμακας διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο. Αυτό επέφερε σαν αποτέλεσμα να γίνει πιο επείγουσα η ανάγκη για στοχαστικό προγραμματισμό των δικτύων μεταφοράς.

Αντί να αντικατασταθεί ο παραδοσιακός ντετερμινιστικός σχεδιασμός μεταφοράς, ο στοχαστικός σχεδιασμός καλείται να τον συμπληρώσει. Η προσθήκη στοχαστικών κριτηρίων σχεδιασμού και τα κριτήρια αξιολόγησης στις διεργασίες σχεδιασμού φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα ροής του πιθανολογικού σχεδιασμού μετάδοσης

Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών αναπτύχθηκαν πιθανολογικά κριτήρια σχεδιασμού, εργαλεία και τεχνικές. Ωστόσο θα είναι απαραίτητο να εξετάζονται από τη βιομηχανία για την πληρότητα και τη δυνατότητα εφαρμογής τους, προτού γίνουν αποδεκτά. Προς το παρόν απαιτείται περισσότερη έρευνα για τις τεχνικές στοχαστικού σχεδιασμού. Είναι επίσης απαραίτητα υψηλής ποιότητας και πληρότητας δεδομένα για την παραγωγή των ΑΠΕ τα οποία όμως είναι προς το παρόν πολύ περιορισμένα.

4.5 Αναβάθμιση Κέντρων Ελέγχου Ενέργειας

4.5.1 Ανάγκες για αναβάθμιση

Εφόσον η δυναμικότητα και η ευελιξία των μονάδων παραγωγής αλλά και η διαθεσιμότητα του δικτύου μεταφοράς έχουν καθοριστεί από τη διαδικασία σχεδιασμού είναι πλέον ευθύνη του χειριστή του συστήματος να διαχειριστεί όλες τις δυνατότητες του συστήματος προκειμένου να αντιμετωπιστούν η κυμαινόμενη και μη εγγυημένη ισχύς που προκύπτει από την ενσωμάτωση μεγάλης κλίμακας ΑΠΕ στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία ως μια ευρεία έννοια, ξεχωριστή από το σχεδιασμό, μπορεί να διαιρεθεί επιπλέον στις διαδικασίες προγραμματισμού κατανομής και ελέγχου (dispatch and control).

Η λειτουργία των σύγχρονων συστημάτων παραγωγής ενέργειας υποστηρίζεται από ένα σύστημα εποπτικού ελέγχου, ένα σύστημα απόκτησης-αναπαράστασης δεδομένων (SCADA) καθώς και μια εφαρμογή διαχείρισης της ενέργειας (EMS). Το σύστημα (SCADA) καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος διάδοσης στοιχείων σ' ένα ΣΗΕ, με αισθητήρες για την παρακολούθηση των λειτουργικών συνθηκών και αποστέλλει τις πληροφορίες στο κέντρο λειτουργίας μέσω καναλιών επικοινωνίας. Το EMS βρίσκεται στο κέντρο λειτουργίας και εκμεταλλεύεται τις πληροφορίες που έχει συλλέξει από το SCADA για να αναλύσει την κατάσταση και να αποκαλύψει οποιαδήποτε προβλήματα στη λειτουργία του ΣΗΕ. Εκτελεί επίσης την ασφαλή και οικονομική κατανομή της παραγωγής, λαμβάνει αποφάσεις ελέγχου και στέλνει εντολές σε πραγματικό χρόνο για τον έλεγχο των στοιχείων του συστήματος. Από τότε που τα σύγχρονα ΣΗΕ βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην ηλεκτρονική επικοινωνία και τον λειτουργικό έλεγχο, έχουν εξελιχθεί σε ένα συνδυασμό φυσικών συστημάτων και συστημάτων του κυβερνοχώρου.

Μέχρι τώρα έχουν αναπτυχθεί διάφορα λειτουργικά εργαλεία (εφαρμογές EMS) και εξελίσσονται για να αντιμετωπίσουν με επιτυχία την υπάρχουσα μεταβλητότητα και αβεβαιότητα στο ΣΗΕ. Μάλιστα επειδή η μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα αυξάνονται σημαντικά με τη διείσδυση των ΑΠΕ, πρέπει να γίνουν μεγάλες βελτιώσεις σε αυτά. Η ανάπτυξη και η ενσωμάτωση ακριβέστερης πρόβλεψης παραγωγής των ΑΠΕ είναι ζωτικής σημασίας. Ενώ η μεγάλης κλίμακας διείσδυση των ΑΠΕ μπορεί επίσης να αποτελεί μεγάλη πρόκληση στη κυβερνοασφάλεια.

4.5.2 Πρόγνωση της παραγωγής από ΑΠΕ

Η πρόγνωση της αιολικής ενέργειας μπορεί να διακριθεί σε πρόγνωση πολύ μικρής διάρκειας, σε βραχυπρόθεσμη πρόγνωση και μεσαία/ μακροπρόθεσμη πρόγνωση. Σήμερα η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η βραχυπρόθεσμη πρόγνωση σε κλίμακα 48-72 ωρών. Οι μέθοδοι για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση διακρίνονται σε φυσικές και στατιστικές μεθόδους αλλά και σε υβριδικές μεθόδους που περιλαμβάνουν τις δύο προηγούμενες.

Οι **φυσικές μέθοδοι** ξεκινούν με ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού το οποίο παρέχει την αναμενόμενη ταχύτητα του ανέμου και την κατεύθυνση του σε μια μελλοντική χρονική στιγμή. Τα επόμενα βήματα περιλαμβάνουν την εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης του ανέμου σε τοπικό επίπεδο, μετατροπή της τοπικής ταχύτητας του ανέμου σε ενέργεια και την περαιτέρω εφαρμογή των προβλέψεων σε ολόκληρη την περιοχή.

Τα **πλεονεκτήματα των φυσικών μεθόδων** είναι:

- Δεν απαιτούν ιστορικά στοιχεία παραγωγής ισχύος από τα αιολικά πάρκα.
- Με βάση τη λεπτομερή ανάλυση της κάθε ατμοσφαιρικής διαδικασίας, το μοντέλο πρόβλεψης μπορεί να βελτιστοποιηθεί ώστε οι προβλέψεις να γίνουν πιο ακριβείς.

Ωστόσο έχουν και το μειονέκτημα ότι είναι πολύ ευαίσθητες σε σφάλματα συστήματος που συνήθως προκαλούνται από λανθασμένη αρχική πληροφορία.

Οι **στατιστικές μέθοδοι** πρώτα καθορίζουν τη σχέση μεταξύ των ιστορικών στοιχείων του καιρού και τα ιστορικά στοιχεία της ισχύος των αιολικών πάρκων με έναν ή περισσότερους αλγορίθμους και στη συνέχεια, βάσει αυτής της σχέσης προβλέπει την ισχύ που παράγει το αιολικού πάρκο.

Τα **πλεονεκτήματα των στατιστικών μεθόδων** είναι:

- Μπορεί να επιτυγχάνουν υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης αν ληφθούν δεδομένα υψηλής ποιότητας.
- Μπορούν να αυτορυθμιστούν ώστε να δώσουν καλά αποτελέσματα ακόμη και αν η είσοδος τους δεν περιλαμβάνεται στο σύνολο εκπαίδευσης.

Τα **μειονεκτήματα των στατιστικών μεθόδων** είναι:

- Απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στα ιστορικά δεδομένα.
- Είναι δύσκολη η κατανόηση των διαδικασιών πληροφόρησης και λήψης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση του μοντέλου.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι και προγράμματα πρόγνωσης αιολικής παραγωγής. Η ακρίβεια της πρόγνωσης έχει βελτιωθεί σημαντικά, ειδικά στη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση. Ωστόσο η ακρίβεια της πρόγνωσης είναι ακόμα χαμηλή σε σχέση με την πρόβλεψη του φορτίου ειδικά σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από μια μέρα. Επιπλέον, η ανάγκη πρόβλεψης σημαντικών καιρικών φαινομένων και η ύπαρξη πιθανοτικών στοιχείων παράλληλα με τα προγνωστικά αποτελέσματα δεν έχει μέχρι στιγμής επιτευχθεί ικανοποιητικά. Παρακάτω αναφέρονται μερικές κατευθύνσεις για τη βελτίωση της ακρίβειας της πρόγνωσης και της αξίας της για τη λειτουργία του συστήματος.

- **Βελτίωση στα μοντέλα και στα δεδομένα**

Οι βελτιώσεις στην ατμοσφαιρική παρακολούθηση και στα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού είναι κρίσιμης σημασίας για τη βελτίωση της ακρίβειας της πρόβλεψης της παραγωγής ΑΠΕ. Είναι επίσης πολύ σημαντική η συλλογή και η επεξεργασία υψηλής ποιότητας μετεωρολογικών και ηλεκτρικών δεδομένων από σταθμούς παραγωγής ΑΠΕ τόσο ιστορικά όσο και σε πραγματικό χρόνο και για το σκοπό αυτό προτείνεται μια τεχνολογία τεσσάρων διαστάσεων η οποία μπορεί να έχει πολύ σημαντικό ρόλο.

- **Συγκεντρωτική πρόγνωση και συνολική πρόγνωση**

Η συγκεντρωτική πρόγνωση σε επίπεδο συστήματος μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια της πρόγνωσης σε σύγκριση με την τοπική πρόγνωση της παραγωγής, χάρη στην επίδραση της γεωγραφικής διασποράς. Είναι επίσης ευεργετικό για τη μείωση του σφάλματος, το ενιαίο κεντρικό προγνωστικό σύστημα να λαμβάνει δεδομένα εισόδου από διάφορους τοπικούς φορείς πρόγνωσης και να τα συνδυάζει για να σχηματιστεί η συνολική πρόγνωση.

- **Πρόγνωση παραγωγής σε τοπικό επίπεδο**

Ενώ η κεντρική πρόγνωση είναι η καλύτερη προσέγγιση για τη λειτουργία του συστήματος είναι απαραίτητη και η τοπική πρόγνωση ούτως ώστε να είναι δυνατή η διαχείριση σε τοπικό επίπεδο και να αποφεύγονται πιθανές τοπικές συμφορήσεις του δικτύου.

- **Πρόγνωση μεγάλων μεταβολών στην παραγωγή**

Η πρόγνωση αιφνίδιων και μεγάλων μεταβολών στην παραγωγή από ΑΠΕ που προκαλούνται από τα σοβαρά καιρικά φαινόμενα έχει μεγάλη σημασία για τον λειτουργό του δικτύου και βοηθάει στη λήψη αποφάσεων. Ωστόσο, οι μέθοδοι για

την πρόγνωση αυτών των γεγονότων χρειάζονται περισσότερη έρευνα προτού η πρόγνωση των αιφνίδιων μεταβολών ενσωματωθεί στα αντίστοιχα λογισμικά πρόγνωσης.

- **Ανθρώπινη πρόγνωση**

Οι διαχειριστές του συστήματος μπορεί να γίνουν καλοί μετεωρολόγοι με τα συσσωρευμένα χρόνια εμπειρίας. Μερικές φορές ξεπερνούν τα προηγμένα προγνωστικά εργαλεία. Απαιτείται περισσότερη έρευνα για το πώς μπορεί να συνδυαστούν καλύτερα η ανθρώπινη με την υπολογιστική πρόγνωση.

- **Στοχαστική πρόβλεψη**

Παρέχοντας όχι μόνο την τιμή αλλά και την πιθανότητα της αναμενόμενης παραγωγής από ΑΠΕ ή των αιφνίδιων μεταβολών στην παραγωγή τους, οι πιθανολογικές προγνώσεις θα μπορούσαν να γίνουν πολύ πιο χρήσιμες για τη λειτουργία του ΣΗΕ.

4.5.3 Ενίσχυση των επιχειρησιακών εργαλείων και πρακτικών

Η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ έχει άμεσο αντίκτυπο στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν γίνει μεγάλες βελτιώσεις στα λειτουργικά εργαλεία και τις πρακτικές και εξακολουθούν να γίνονται μελέτες πάνω σε αυτά. Αναφέρονται παρακάτω συνοπτικά μερικές σημαντικές βελτιώσεις που σχετίζονται με τις εφαρμογές των EMS. Η βασική αρχή πίσω από αυτές τις εξελίξεις είναι η βελτίωση των γνώσεων των λειτουργών του συστήματος, αξιολογώντας τα πιθανά γεγονότα και τις επιπτώσεις τους και προσφέροντας καθοδήγηση στους φορείς σχετικά με τα πιθανά αντίστοιχα μέτρα που πρέπει να λάβουν.

- **Πρόγραμμα οικονομικής λειτουργίας των μονάδων παραγωγής (Unit Commitment)**

Οι λεπτομερείς μελέτες για τη δέσμευση των μονάδων διεξάγονται κανονικά μια μέρα πριν για να προσδιοριστούν τα μεγέθη και το είδος των συμβατικών μονάδων παραγωγής που χρειάζεται να τεθούν σε λειτουργία. Οι μονάδες αυτές θα πρέπει να είναι διαθέσιμες κάθε χρονική στιγμή έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η επιθυμητή δυναμικότητα παραγωγής καθώς επίσης και η αναγκαία ευελιξία στη μεταβλητότητα και αβεβαιότητα του συστήματος. Με την αύξηση των επιπέδων παραγωγής από ΑΠΕ αναγνωρίζεται ότι το πρόγραμμα οικονομικής λειτουργίας των μονάδων παραγωγής δεν θα είναι αποτελεσματικό αν δεν ληφθεί υπόψη η πρόγνωση της παραγωγής των ΑΠΕ η οποία μάλιστα θα πρέπει να γίνεται σε ολόενα και πιο τακτά χρονικά διαστήματα (κάθε 4 με 6 ώρες ή και πιο συχνά αν χρειαστεί).

- **Ανάλυση έκτακτης ανάγκης**

Η ανάλυση έκτακτης ανάγκης αξιολογεί τις επιπτώσεις των δυνητικών κινδύνων οι οποίες είναι συνήθως διακοπές λειτουργίας των διαφορετικών συνιστωσών του δικτύου υπό ορισμένες συνθήκες. Με τα αυξημένα επίπεδα της παραγωγής από ΑΠΕ η ανάλυση έκτακτης ανάγκης πρέπει να διευρυνθεί προκειμένου να συμπεριλάβει τις μεγάλες μεταβολές της παραγωγής των ΑΠΕ καθώς και τις πιθανές διακοπές λειτουργίας των σταθμών ΑΠΕ. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη προγνώσεων της παραγομένης ισχύς τους για τον προσδιορισμό των πιθανών απρόοπτων γεγονότων.

- **Ανάλυση ασφαλείας σε πραγματικό χρόνο**

Η ανάλυση ασφαλείας σε πραγματικό χρόνο (Online Dynamic Security Analysis-DSA) έχει εφαρμοστεί σε πολλά κέντρα ελέγχου ΣΗΕ για να βοηθήσει τους υπεύθυνους διαχειριστές του συστήματος να πάρουν σωστές αποφάσεις. Η μέθοδος αυτή αξιολογεί την ασφάλεια του συστήματος και τα όρια ευστάθειας με βάση την τοπολογία του δικτύου, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, όπως είναι τα θερμικά όρια των γραμμών και η μεταβατική ευστάθεια τάσης και συχνότητας. Με την ενσωμάτωση της πρόγνωσης της παραγωγής από ΑΠΕ ένα σύστημα DSA μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα για να αντιμετωπιστούν οι λειτουργικοί κίνδυνοι και προκλήσεις που απορρέουν από την αυξημένη χρήση των ΑΠΕ.

- **Οικονομική κατανομή με περιορισμούς ασφάλειας**

Η συγκεκριμένη μέθοδος καθορίζει τον τρόπο ελέγχου των γεννητριών για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με το χαμηλότερο κόστος που απαιτείται για την ικανοποίηση της αξιοπιστίας και των λειτουργικών ορίων στις εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς. Τελευταία εξελίσσεται για να συμπεριλάβει δύο κύριες κατευθύνσεις:

- Την αύξηση της υψηλής διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο
- Τη βελτίωση στην απόκριση της ζήτησης και στις εφαρμογές των έξυπνων δικτύων (smart grids)

Όπως περιγράφηκε και στην ενότητα 4.3 χρειάζεται περισσότερη ευελιξία στα δίκτυα συμβατικής παραγωγής για την επίτευξη της ενσωμάτωσης μεγάλης κλίμακας παραγωγής από ΑΠΕ. Οι αυξημένες απαιτήσεις των θερμικών σταθμών παραγωγής, που προκύπτουν από την κυκλική συμπεριφορά και τις αιφνίδιες μεταβολές της παραγωγής των ΑΠΕ, θα οδηγήσουν σε σημαντική αύξηση των λειτουργικών τους εξόδων. Οι δαπάνες αυτές πρέπει να υπολογιστούν καλύτερα από την αρχή για να ληφθούν υπόψη και να βελτιωθεί η οικονομική κατανομή.

- **Αυτόματος έλεγχος παραγωγής**

Ο αυτόματος έλεγχος παραγωγής (automatic generation control - AGC) είναι ένα κεντρικό σύστημα που έχει σχεδιαστεί για να εξασφαλίσει σε πραγματικό χρόνο το ισοζύγιο ισχύος/ φορτίου και τη σταθερότητα της συχνότητας με τη ρύθμιση της ισχύος εξόδου των μονάδων παραγωγής και των ανταλλαγών ισχύος στις γραμμές διασύνδεσης μεταξύ διαφορετικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ή διαφορετικών περιοχών ελέγχου. Οι ήδη υπάρχοντες αλγόριθμοι AGC πρέπει να

τροποποιηθούν έτσι ώστε, με βάση τις προβλέψεις παραγωγής ΑΠΕ να μπορούν να αντιμετωπίσουν τη μεταβλητότητα και την αβεβαιότητα της παραγωγής των ΑΠΕ. Επίσης, αρχίζουν να επιβάλλονται αυξανόμενες απαιτήσεις για ρύθμιση της ισχύος εξόδου των σταθμών ΑΠΕ με βάση τις προηγμένες δυνατότητες συστημάτων ελέγχου και επικοινωνίας δεδομένων που εφαρμόζονται πλέον στους σταθμούς ΑΠΕ.

- **Στοχαστικές λειτουργίες και λήψη αποφάσεων με ανάλυση ρίσκου.**

Για την αντιμετώπιση της αυξημένης αβεβαιότητας, συμπεριλαμβανομένων των προγνώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή των ΑΠΕ, πολλοί ερευνητές πιστεύουν ότι οι μελλοντικές εφαρμογές των EMS πρέπει να κάνουν μεγαλύτερη χρήση των στοχαστικών τεχνικών μοντελοποίησης. Για παράδειγμα, η στοχαστική δέσμευση των μονάδων, η στοχαστική οικονομική κατανομή με περιορισμούς ασφάλειας και η στοχαστική βέλτιστη ροή ισχύος είναι πλέον εφικτές λόγω της μεγαλύτερης υπολογιστικής ισχύος που είναι ήδη διαθέσιμη. Οι τεχνικές για τη λήψη αποφάσεων που βασίζονται στον κίνδυνο είναι επίσης αναγκαίες για τη βελτίωση της τρέχουσας διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Γι' αυτό είναι κρίσιμη η έρευνα σχετικά με την ποσοτικοποίηση των σχετικών λειτουργικών κινδύνων και τη σοβαρότητα των απρόβλεπτων ακράιων γεγονότων.

- **Σχέδιο ασφάλειας**

Η ασφάλεια στις διαδικασίες δυναμικής εκτίμησης ασφαλείας και δέσμευσης μονάδων με περιορισμούς ασφαλείας (DSA και SCED) κυρίως αναφέρεται στις φυσικές πτυχές της ασφάλειας του ΣΗΕ ή στην ασφάλεια του εφοδιασμού. Το ΣΗΕ αντιμετωπίζει ακόμα προκλήσεις σε επίπεδο ελέγχου και λειτουργίας συμπεριλαμβανομένης της αξιοπιστίας των συστημάτων επικοινωνίας που το εξυπηρετούν καθώς και την προστασία των κρίσιμων πληροφοριών που σχετίζονται με την παρακολούθηση και τον έλεγχο του συστήματος τροφοδοσίας καθώς και εμπιστευτικές πληροφορίες των πελατών. Αποτυχίες σε επίπεδο ελέγχου, ιδίως εκείνων που προκαλούνται από κακόβουλες επιθέσεις στο σύστημα ελέγχου μπορεί να βλάψουν τα στοιχεία του ΣΗΕ και να θέσουν σε κίνδυνο την ασφαλεία του. Δεδομένου ότι οι σταθμοί ΑΠΕ ς είναι συνήθως σε απομακρυσμένες τοποθεσίες και αποτελούνται από πολλές καταναεμημένες μονάδες παραγωγής μικρής κλίμακας η κυβερνοασφάλεια του συστήματος ελέγχου απαιτεί περισσότερη προσοχή. Αν και έχουν γίνει προσπάθειες από ορισμένους οργανισμούς να επιτύχουν τον έλεγχο της ασφαλείας του συστήματος,

όπως με τα συστήματα SCADA και EMS, η τρωτότητα του κυβερνοχώρου εξακολουθεί να είναι ένα εξέχον πρόβλημα και γίνεται ακόμη πιο περίπλοκο με την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων.

Με την ένταξη των ΑΠΕ στο ΣΗΕ υπάρχει μεγάλη ανάγκη για την ύπαρξη ολοκληρωμένων πολιτικών ασφαλείας μεταξύ των συστημάτων πρόγνωσης καιρού και ειδικά τη λειτουργία κατανομής. Για παράδειγμα ένα ιδιαίτερα ασφαλές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή διείσδυση ενέργειας από ΑΠΕ είναι αρκετά ευάλωτο σε μια επίθεση που στοχεύει την υπηρεσία πρόγνωσης καιρού της χώρας είτε διαταράσσοντας την πρόβλεψη ή την παροχή ψευδών προγνωστικών δεδομένων. Ο χειριστής του δικτύου που βασίστηκε σε τέτοια δεδομένα μπορεί να βρεθεί σε εξαιρετικά δύσκολη θέση.

4.6 Απόκριση ζήτησης

4.6.1 Απόκριση φορτίου (Demand Response DR)

Η απόκριση φορτίου, η ανάπτυξη και η επέκταση της παραδοσιακής διαχείρισης της ζήτησης ή πρακτικές διαχείρισης φορτίου αναγνωρίζονται ως μια βασική εφαρμογή του έξυπνου δικτύου. Οι αλλαγές στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά του φορτίου σε σχέση με τις συνηθισμένες καταναλωτικές τους συνήθειες, σε απάντηση των μεταβολών της τιμής του ρεύματος ή κινήτρων αποζημίωσης, σκοπεύουν να ενθαρρύνουν τη μικρότερη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε περίοδο υψηλών τιμών αγοράς ή όταν η αξιοπιστία του συστήματος είναι σε κίνδυνο.

Καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ θα αυξηθεί η αξία της απόκρισης φορτίου ως πρόσθετη πηγή ευελιξίας του ΣΗΕ για την αντιστάθμιση της μεταβλητότητας και της αβεβαιότητας που προκαλούν οι ΑΠΕ. Για παράδειγμα στην Ισπανία το 2007 δημιουργήθηκε ένα τμήμα διαχείρισης της ζήτησης με σκοπό την προώθηση κατάλληλων μηχανισμών όπως είναι η διακοπτόμενη υπηρεσία, η ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων και οι έξυπνοι μετρητές. Αυτοί οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται από κοινού αναμένεται να ενισχύσουν την ικανότητα ενσωμάτωσης μεγάλης κλίμακας ΑΠΕ στο σύστημα. Η απόκριση φορτίου μπορεί να βοηθήσει στην ενσωμάτωση των ΑΠΕ με δύο βασικούς τρόπους, τη μετατόπιση του φορτίου (load shifting) και την εξισορρόπηση.

- **Μετατόπιση του φορτίου**

Η απόκριση φορτίου μεταφέρει σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ένα μέρος του φορτίου για να απορροφήσει την υπερβολική παραγωγή ΑΠΕ, ιδιαίτερα για την αιολική παραγωγή η οποία συχνά εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά καθώς μπορεί να παράγει περισσότερη ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και λιγότερη ενέργεια σε περιόδους αιχμής της ζήτησης. Συχνά σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, οι συμβατικοί σταθμοί έχουν ήδη μειώσει στο ελάχιστο την ενέργεια που δίνουν στο δίκτυο και η ανεπάρκεια της ζήτησης οδηγεί αναπόφευκτα στην περικοπή της αιολικής ενέργειας μειώνοντας τη χρήση της παραγόμενης ενέργειας από τα αιολικά πάρκα και εμποδίζοντας την αντικατάσταση της ενέργειας από ορυκτά καύσιμα για τη μείωση των αέριων εκπομπών. Η μετατόπιση φορτίου σε περιόδους χαμηλής ζήτησης φέρνει επίσης επιπλέον ενεργειακή αποτελεσματικότητα και ωφέλη στους πελάτες. Για παράδειγμα η Δανία έχει θέσει σε εφαρμογή μηδενικές ή και αρνητικές τιμές ρεύματος για να ενθαρρύνει τους

πελάτες να χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια τις ώρες της περίσσειας αιολικής ενέργειας και έχει προγραμματίσει την αύξηση της ενσωμάτωσης μεταξύ των μεταφορών, της θέρμανσης και τους τομείς της ηλεκτρικής ενέργειας για να βρουν νέες πηγές φορτίου σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.

- **Υπηρεσίες για την εξισορρόπηση της ζήτησης**

Μπορεί να αναπτυχθεί ταχείας δράσης απόκριση φορτίου για να βοηθήσει στην τήρηση του ισοζυγίου φορτίου – ζήτησης σε πραγματικό χρόνο. Τα φορτία μπορεί να είναι συγκεντρωτικά και έτοιμα να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα και ως εκ τούτου να είναι σε θέση να ακολουθήσουν τις γρήγορες μεταβολές της παραγωγής από ΑΠΕ, μειώνοντας την ανάγκη για μεταβολή της δυναμικότητας της συμβατικής παραγωγής. Ορισμένοι διαχειριστές συστημάτων χρησιμοποιούν ήδη την απόκριση φορτίου για την αντιμετώπιση των αιφνίδιων μειώσεων της παραγωγής από ΑΠΕ, δείχνοντας δυνητικά ευελιξία ίση με αυτή της συμβατικής παραγωγής. Όμως, κάθε τύπος φορτίου έχει διαφορετικές δυνατότητες ανταπόκρισης και διαφορετικά κόστη και έτσι χρειάζεται περισσότερη έρευνα για να προσδιοριστεί η πραγματική συνολική δυναμικότητα της απόκρισης φορτίου στην εξισορρόπηση της ζήτησης.

4.6.2 Πρακτικές στην απόκριση φορτίου

Οι πρακτικές της απόκρισης φορτίου ποικίλουν όχι μόνο ανά χώρα, λόγω των διαφορών στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, την τεχνολογική ανάπτυξη και τους στόχους ανάπτυξης της αλλά και εντός των ορίων ορισμένων χωρών. Π.χ. τα κορυφαία προγράμματα απόκρισης φορτίου στις ΗΠΑ ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- **Προγράμματα κατανομής** γνωστά και ως προγράμματα διαχείρισης ή ελέγχου του φορτίου επιτρέπουν τον άμεσο έλεγχο της του φορτίου από το διαχειριστή του δικτύου. Συχνά προσφέρεται ένα κίνητρο στους πελάτες για την ενθάρρυνση της συμμετοχής τους στα προγράμματα αυτά.
- **Προγράμματα απόκρισης πελατών** τα οποία βασίζονται σε πελάτες που ανταποκρίνονται εθελοντικά στα σήματα που λαμβάνουν από το λειτουργό του δικτύου. Το πιο κοινό σήμα που χρησιμοποιείται σήμερα είναι η τιμή του ρεύματος αν και άλλοι τύποι πληροφοριών όπως τα περιβαλλοντικά σήματα ή τα γειτονικά – συγκριτικά δεδομένα μπορεί να αποδειχθούν χρήσιμα στο μέλλον. Τα προγράμματα απόκρισης των πελατών μπορούν να διαιρεθούν περαιτέρω σε προγράμματα χονδρικής που χορηγούνται από ανεξάρτητους διαχειριστές συστημάτων και περιφερειακούς οργανισμούς δικτύων μεταφοράς και προγράμματα λιανικής με τις τιμές λιανικής πώλησης να καθορίζονται από συγκεκριμένες χρονικά μεταβαλλόμενες δομές τιμολόγησης.

Παρά το γεγονός ότι τα κατανεμημένα προγράμματα εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ποσοστό, η έλευση των έξυπνων μετρητών οι οποίοι επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή πληροφόρησης μεταξύ των πελατών και των διαχειριστών, οδήγησε στην ανάπτυξη και βελτίωση της σύνδεσης των οικιακών και εμπορικών πελατών.

Ο στόχος της ανάπτυξης της απόκρισης φορτίου ήταν να προχωρήσει πέρα από την απλή βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος και να επεκταθεί στη βελτίωση της αποδοτικότητας και ευελιξίας του συστήματος. Η συχνότητα με την οποία χρησιμοποιείται η απόκριση φορτίου έχει διευρυνθεί από τη χρήση έκτακτης ανάγκης σε καθημερινή χρήση και σε πραγματικό χρόνο. Οι συμμετέχοντες στην απόκριση φορτίου έχουν επίσης διευρυνθεί από τους μεγάλους βιομηχανικούς και εμπορικούς πελάτες και σε μικρότερους εμπορικούς και οικιακούς πελάτες, με περισσότερους μεσάζοντες να ενεργούν ως ενδιάμεσοι φορείς μεταξύ δημοσίου ή διαχειριστών δικτύου και μεμονωμένων πελατών.

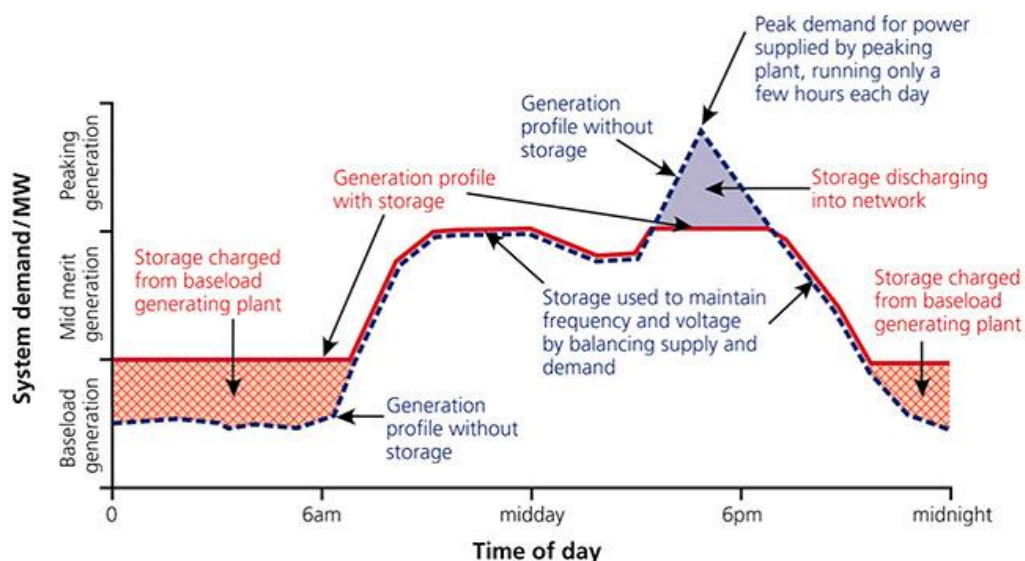
Τελικά οι μέθοδοι απόκρισης φορτίου έχουν επεκταθεί από μια κατεύθυνση προς δύο κατευθύνσεις μειώνοντας ή αυξάνοντας το φορτίο ανάλογα με τις απαιτήσεις.

- **Απόκριση ζήτησης για τη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος**

Η πιο παλιά και πιο κοινή πρακτική απόκρισης φορτίου εστιάζει στην αξιοπιστία του ΣΗΕ. Συχνά μια βιομηχανική μονάδα συμφωνεί στη μείωση του φορτίου για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος υπό συνθήκες υψηλής ζήτησης ή άλλων γεγονότων έκτακτης ανάγκης και δίνεται ένα κίνητρο για κάτι τέτοιο.

- **Απόκριση ζήτησης για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος**

Πρόσφατα το επίκεντρο της απόκρισης φορτίου έχει στραφεί ολοένα και περισσότερο στην αποδοτικότητα του συστήματος. Πολλά προγράμματα απόκρισης φορτίου έχουν αρχίσει να επικεντρώνονται στην περικοπή του φορτίου σε περίοδο αιχμής και μεταφορά του στην αμέσως επόμενη περίοδο χαμηλής ζήτησης. Έτσι η συνδυασμένη αποδοτικότητα μεταφοράς, διανομής και παραγωγής αυξάνεται.



Εικόνα 4.10: Διαχείριση φορτίου

- **Απόκριση ζήτησης για τη βελτίωση της ευελιξίας του συστήματος**

Αυτή η αναδυόμενη εφαρμογή της απόκρισης φορτίου είναι πολύ σημαντική για τη διείσδυση των ΑΠΕ. Για το σκοπό αυτό τα προγράμματα κατανομής είναι πιο

αποτελεσματικά ενώ τα προγράμματα απόκρισης πελατών μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματικά. Σε ορισμένες περιοχές απαιτούνται αλλαγές στους κανόνες και την αξιοπιστία των προτύπων αγοράς για να συμμετέχουν στην παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης. Αυτή η εφαρμογή της απόκρισης φορτίου οραματίστηκε περαιτέρω ως κατανομή της ζήτησης η οποία αναμένεται να εκτελέσει πολλές από τις ίδιες βοηθητικές υπηρεσίες που παρέχονται σήμερα από συμβατικές μονάδες παραγωγής. Πιθανά φορτία που είναι κατάλληλα για την κατανομή της ζήτησης είναι εκείνα τα οποία όταν ελέγχονται εξ' αποστάσεως θα περάσουν σε μεγάλο βαθμό απαρατήρητα από τους πελάτες όπως οι θερμοσίφωνες, τα αερόθερμα, τα συστήματα ηλεκτρισμού και τα ηλεκτρικά οχήματα.

4.6.3 Τεχνολογίες που ενισχύουν την απόκριση ζήτησης.

Αν και η επιτυχία των προγραμμάτων απόκρισης φορτίου εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις αποτελεσματικές εμπορικές ρυθμίσεις (συμπεριλαμβανομένων δομών ποσοστών και των συστημάτων τιμολόγησης) και σε μια ακριβή αξιολόγηση της σχέσης κόστους – αποτελεσματικότητας ορισμένες τεχνολογίες είναι απαραίτητες για την καλύτερη λειτουργία των προγραμμάτων απόκρισης φορτίου .

Μετρητικές διατάξεις προηγμένης τεχνολογίας

Οι μετρητικές διατάξεις

προηγμένης τεχνολογίας, κοινώς γνωστοί ως έξυπνοι μετρητές, επιτρέπουν την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των πελατών και των διαχειριστών. Αυτή είναι η τεχνική βάση για την εφαρμογή περισσότερων προγραμμάτων απόκρισης φορτίου στο μέλλον, ιδίως από μικρότερους πελάτες. Αυτό επιτρέπει στους πελάτες να λαμβάνουν σήματα πληροφοριών, από τους διαχειριστές, που αφορούν την τιμή του ρεύματος, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και βοηθητικά στοιχεία που αποκαλύπτουν πόση ενέργεια χρησιμοποιούν οι πελάτες κάθε στιγμή.

- **Τεχνολογία έξυπνων μετρητών**

Οι τεχνολογίες έξυπνων μετρητών και τα οικιακά δίκτυα επιτρέπουν επίσης τη χρήση μίας σειράς τεχνολογιών που αφορούν τη διαχείριση ενέργειας ενός κτιρίου ή σπιτιού όπως ελεγχόμενες συσκευές, συσκευές παρακολούθησης και ανάλυσης της χρήσης ενέργειας και θερμοστάτες που λειτουργούν ανάλογα με την τιμή του ρεύματος. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να εφαρμοστούν καλύτερα σε μικρότερους οικιακούς πελάτες δίνοντας τους τα απαραίτητα σήματα που θα τους καθοδηγήσουν στην πιο οικονομική χρήση του ρεύματος. Ωστόσο οι τεχνολογίες αυτές είναι σήμερα σχετικά ανώριμες και δαπανηρές.

- **Ηλεκτρικά οχήματα**

Τα ηλεκτρικά οχήματα προορίζονται για μια ποικιλία χρήσεων. Τα οχήματα αυτά δεν έχουν μόνο χαμηλή εκπομπή ρύπων αλλά έχουν και τη δυνατότητα να λειτουργούν ως εγκαταστάσεις αποθήκευσης από τις οποίες η ενέργεια μπορεί να αποστέλλεται στο δίκτυο ή στο σπίτι. Τις νυχτερινές ώρες μπορούν να απορροφούν την περίσσεια π.χ. αιολική ενέργεια ώστε να βοηθούν στην τήρηση του ισοζυγίου ισχύος- φορτίου και κατά συνέπεια στην πιο αρμονική ενσωμάτωση των ΑΠΕ.

- **Λύσεις διαδικτυακής ασφάλειας**

Από τότε που οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν τον συντονισμό και τον έλεγχο ενός μεγάλου αριθμού φορτίων με χρήση πολλών μηνυμάτων επικοινωνίας προκύπτουν σοβαρές δυσκολίες σχετικά με την ασφάλεια του κυβερνοχώρου. Καταρχάς οι ιδιωτικές πληροφορίες των πελατών οι οποίες είναι σχετικές με τις συνήθειες ζωής τους, είναι ευάλωτες. Δεύτερον οι πληροφορίες μπορεί να τροποποιηθούν σκόπιμα ή ψεύτικα για οικονομικό όφελος. Ακόμα πιο σοβαρές ανησυχίες υπάρχουν από την πλευρά της λειτουργίας του συστήματος για την πιθανότητα λάθους χειρισμού που μπορεί να βλάψει την ασφάλεια και τη σταθερότητα του συστήματος. Για παράδειγμα μια μεγάλη ποσότητα του φορτίου μπορεί να οδηγηθεί κακόβουλα προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Ως εκ τούτου η επιτυχία της τεχνολογίας απόκρισης φορτίου εξαρτάται από τη διαχείριση αυτών των κινδύνων μέσω της ανάπτυξης τεχνολογιών βασισμένων σε ασφαλή πρότυπα, στις πολιτικές και τους νόμους. Η λύση σε οποιοδήποτε πρόβλημα ασφαλείας πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος οποιουδήποτε προγράμματος απόκρισης φορτίου από την αρχή.

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, προκύπτει από την προηγούμενη ανάλυση ότι είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκύπτουν από τη μεγάλη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας βάσει μιας ποικιλίας τεχνολογικών λύσεων που είναι ήδη διαθέσιμες.

Καταρχάς προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αυξημένη μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα που προκύπτει από την ενσωμάτωση μεγάλης κλίμακας ΑΠΕ στο δίκτυο, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να γίνει πιο ευέλικτο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το ισοζύγιο ισχύος, δηλαδή να υπάρχει διαρκής ισορροπία μεταξύ της ενέργειας που παράγεται και της ενέργειας που καταναλώνεται. Η ευελιξία του ΣΗΕ μπορεί να επιτευχθεί τόσο από την πλευρά της παραγωγής, συμβατικής ή μέσω των ΑΠΕ, όσο και από την πλευρά του φορτίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί καλύτερα αν βελτιωθούν οι τεχνολογίες και οι πρακτικές στη λειτουργία του συστήματος οι οποίες πρέπει να είναι βασισμένες στον έλεγχο ευρύτερων γεωγραφικών περιοχών, στις οποίες πρέπει να επεκταθεί το δίκτυο μεταφοράς ενέργειας.

Η ενέργεια που παράγεται μέσω των μονάδων ΑΠΕ μπορεί να γίνει πιο προβλέψιμη, πιο ελεγχόμενη και να κατανεμηθεί πιο εύκολα, δηλαδή πιο φιλική για το δίκτυο, με τη βελτίωση των τεχνολογιών σχεδιασμού λειτουργίας και μοντελοποίησης ανανεώσιμων μονάδων παραγωγής.

Η κύρια πηγή ευελιξίας του ΣΗΕ, προς το παρόν αλλά και για το άμεσο μέλλον, είναι η ευελιξία της συμβατικής παραγωγής. Ο σχεδιασμός του συστήματος παραγωγής πρέπει να επικεντρωθεί τόσο στη αποδοτικότητα όσο και στη ευελιξία του συστήματος. Κάθε είδος ΑΠΕ έχει διαφορετικό βαθμό ευελιξίας αλλά είναι πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί η ευελιξία του και κατά συνέπεια και η συνολική ευελιξία του συστήματος.

Οι τεχνολογίες μεταφοράς συνεχούς ρεύματος που βασίζονται στις τεχνολογίες FACTS (Flexible AC Transmission Systems) ανοίγουν το δρόμο για την επέκταση και ενίσχυση των συστημάτων μεταφοράς για την υποδοχή μεγάλων σταθμών ΑΠΕ.

Όσον αφορά την αβεβαιότητα και τη μεταβλητότητα που θα προκύψει ακόμα περισσότερο στο μέλλον στα ΣΗΕ λόγω της συνεχούς ένταξης των ΑΠΕ, είναι επιθυμητή η ανάπτυξη στοχαστικών μεθόδων σχεδιασμού του συστήματος μεταφοράς και παραγωγής. Σε κάθε στάδιο λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (προγραμματισμός, κατανομή,

μεταφορά, διανομή και έλεγχος) πρέπει να γίνουν βελτιώσεις στις υπάρχουσες τεχνολογίες και πρακτικές. Μεταξύ άλλων, πολύ σημαντική είναι η ανάπτυξη ακριβέστερων προβλέψεων παραγωγής ενέργειας μέσω ΑΠΕ και η ενσωμάτωση τους στον προγραμματισμόλειτουργίας και τα εργαλεία ελέγχου ενός ΣΗΕ.

Η απόκριση της ζήτησης, που υποστηρίζεται από τα έξυπνα δίκτυα (smart grids), έξυπνα σπίτια και άλλες παρόμοιες τεχνολογίες είναι μια υποσχόμενη πηγή ευελιξίας για το ΣΗΕ, αλλά είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο. Ο χρόνος που θα χρειαστούν για να ωριμάσουν και να εφαρμοστούν οι τεχνολογίες αυτές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανόηση της συμπεριφοράς των πελατών που αφορούν τη ζήτηση του φορτίου καθώς και από τις θεσμικές και εμπορικές καινοτομίες που θα αναπτυχθούν στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

- [1] Aidan Tuohy, et al. Flexibility Assessment Tool: IEA Grid Integration of Variable Renewables Project, IEEE Power & Energy Society General Meeting Power System Flexibility Panel, 2011
- [2] Alec Brooks, et al.: Demand Dispatch: Using Real-Time Control of Demand to Help Balance Generation and Load, IEEE Power & Energy Magazine, 8(3), p20-29, May/June 2010
- [3] Antonio Luque, Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd (2003)
- [4] Douglas Todd: Managing Large-Scale Penetration of Intermittent Renewables, MITEI Symposium on Managing Large-Scale Penetration of Intermittent Renewables, Cambridge/U.S.A, April 2011
- [5] Ernst Scholtz: Grid Integration of Renewables: Challenges and Technologies, MITEI Symposium on Managing Large-Scale Penetration of Intermittent Renewables, Cambridge/U.S.A, April 2011
- [6] European Photovoltaic Association: Global Market Outlook for Photovoltaics until 2014, Report, May 2010
- [7] European Smart Grids Technology www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf
- [8] H. Holttinen, et al. Design and operation of power systems with large amounts of wind power, Final report, IEA Wind Task 25, 2009
- [9] H.Lee Willis, Walter G.Scott, “Distributed Power Generation, Planning and Evaluation”, Marcel Dekker
- [10] I. Perez-Arriaga: Managing Large Scale Penetration of Intermittent Renewables, MITEI Symposium on Managing Large-Scale Penetration of Intermittent Renewables, Cambridge/U.S.A, 20 April 2011
- [11] International Electrotechnical Commission (IEC), Grid integration of large-capacity Renewable Energy Sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage
- [12] Jaeseok Choi, Trungtin Tran, A.(Rahim)A.El-Keib, Robert Thomas, HyungSeon Oh, Roy Billinton, A Method for Transmission System Expansion Planning Considering Probabilistic Reliability Criteria, IEEE Transactions on Power Systems, 2005
- [13] Leon Freris, David Infield, “Renewable Energy in Power Systems”, Wiley
- [14] Massachusetts Institute of Technology: The Future of The Electric Grid, Report, 2011
- [15] Mohan/Underland/Robbins , Ηλεκτρονικά Ισχύος, Β΄ Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- [16] Powering Europe: wind energy and the electricity grid, report by European Wind Energy Association, November 2010

- [17] PV Magazine. (2015, 2 3). PV Magazine, Photovoltaic Markets & Technology. Retrieved from PV Magazine Global
- [18] Richard Piwko, et al.: A Blast of Activity: Wind Power at the IEEE Power & Energy Society, IEEE Power & Energy Magazine, 9(6), p26-35, Nov/Dec 2011.
- [19] Richard Piwko, et al.: Penetrating Insights: Lessons Learned from Large-Scale Wind Power Integration, IEEE Power & Energy Magazine, Mar/Apr 2012
- [20] S. You, et al.: Economic Dispatch of Electric Energy Storage with Multi-service Provision, IPEC 2010
- [21] Scott Coe, et al.: Demanding Standards: Developing Uniformity in Wholesale Demand Response Communications to Enhance Industry Growth, IEEE Power & Energy Magazine, May/June 2010
- [22] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, Ltd, 2005
- [23] T. Vav Cutsem, C. Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers, 1998
- [24] The European Wind Energy Association: Large Scale Integration of Wind Energy in The European Power Supply: Analysis, Issues and Recommendations, Report, Dec 2005
- [25] Thomson, M., and D.G. Infield (2007). Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems. IET Renewable Power Generation
- [26] Tomas Markvart, « Ηλεκτρισμός από ηλιακή ενέργεια », Εκδόσεις ΙΩΝ (2003)
- [27] www.desmie.gr : Διαχειριστής Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
- [28] www.wikipedia.org
- [29] Z. Lubosny, Wind Turbine Operation in Electric Power Systems, Springer Publications, Germany, 2003
- [30] Αναγνώστου Γεώργιος, Οικονομικά Οφέλη από την Αυξημένη Διείσδυση Μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο ελληνικό σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ιούλιος 2011
- [31] Αντώνιος Τσικαλάκης, ‘‘Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης’’, Διδακτορική διατριβή Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα Ιούλιος 2008
- [32] Αποστολόπουλος Χρήστος, Προηγμένοι Αλγόριθμοι Εντοπισμού Σφαλμάτων σε Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με Χρήση Συγχρονισμένων ή μη Μετρήσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Απρίλιος 2011
- [33] Αριστείδης Πέτρος, Μοντελοποίηση και Ανάλυση Μικροδυκτίων με μεθόδους της Θεωρίας Παιγνίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2010
- [34] Βογιατζάκης Γιώργος, Βραχυπρόθεσμος Υδροθερμικός Προγραμματισμός και Μελέτη μη Διασυνδεδεμένου ΣΗΕ με Μεγάλη Διείσδυση ΑΠΕ και Αντλησιοταμίευση με Δυνατότητα Άντλησης από το Δίκτυο σε Συνθήκες Βέλτιστης Ροής Φορτίου, Οκτώβριος 2009
- [35] Βουρνάς & Κονταξής, (2010). Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία

- [36] Βουρνάς. Κ, Κονταξής. Γ, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. – 2001.
- [37] Γαβρήλ Β. Γιαννακόπουλος, Νικόλαος Α. Βοβός. Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Θεσσαλονίκη: Ζήτη 2008.
- [38] Γεραλής Νικόλαος, Συστήματα Αποθήκευσης ενέργειας και εφαρμογές στη μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Δεκέμβριος 2009
- [39] Γκατζής Αθανάσιος- Ιωάννης Κ. Κατριαδάκης, «Μέτρηση βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων και μελέτη της εξάρτησής του από τη θερμοκρασία», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Ιούνιος 2008
- [40] Γκίκας Δημήτριος, Δημιουργία αρχείου ανεμολογικών δεδομένων και ανάπτυξη προγράμματος υπολογισμού καμπυλών Weibull για τη διαχείριση της αιολικής ενέργειας, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (2011)
- [41] Δαούτης Λουκάς, Επίδραση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Αξιοπιστία Λειτουργίας των Συστημάτων Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Μάρτιος 2004
- [42] Εξαδάκτυλος Κωνσταντίνος, Μελέτη Σφαλμάτων σε Γραμμές Μεταφοράς, Πανεπιστήμιο Πατρών τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
- [43] Κανέλλος Φώτης, Συμβολή στην Προσομοίωση και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδυνάμων Μοντέλων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Νοέμβριος 2003
- [44] Κανέλλος Φώτης, Διασυνδεδεμένα Φωτοβολταϊκά Συστήματα Σημειώσεις Μαθήματος Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
- [45] Κανέλλος Φώτης, Παρουσιάσεις Μαθήματος Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας από ΑΠΕ. Χανιά: Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, 2012
- [46] Καραμπατάκη Δήμητρα, Η Συμβολή των Υδροηλεκτρικών Έργων στις πολλαπλές χρήσεις νερού: Η κατάσταση στην Ελλάδα, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Οκτώβριος 2009
- [47] Κορνά – Μηνά Κώτη, Έλεγχος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες σε αυτόνομα δίκτυα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Σεπτέμβριος 2013
- [48] Κονδύλης Θεμιστοκλής, Πρόγραμμα Αυτόματου Υπολογισμού του Κόστους Σύνδεσης Αιολικών Πάρκων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Φεβρουάριος 2009
- [49] Κορωνίδης Α, Το Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Συνθήκες Μεγάλης Διείσδυσης Ανανεώσιμων Πηγών, Ημερίδα Συλλόγου Μηχανικών ΔΕΗ-ΤΕΕ, Αθήνα, 2003
- [50] Κούρπα Ιωάννα – Μιχαλοδημητράκη Κατερίνα, Τεχνικά Προβλήματα από μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ – Τρόποι αντιμετώπισής τους, Πολυτεχνείο Κρήτης – ΜΠΔ, Φεβρουάριος 2013
- [51] Κουσουλίδης Ραφαήλ, Ανάπτυξη Λογισμικού για Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Φεβρουάριος 2015

- [52] Λαγόπουλος Ισίδωρος, «Πειραματική μελέτη φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών υμενίων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2011
- [53] Λάμπρου-Στυφαλιά, Μελέτη Προβλήματος Κατανεμημένης Παραγωγής στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πάτρα Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2008
- [54] Μαρούδας Διονύσιος, Συγκριτική ανάλυση αιολικών συστημάτων και έλεγχος ισχύος σε σύστημα με ΑΜΔΤ (Ασύγχρονη Μηχανή Διπλής Τροφοδοσίας), Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (2008)
- [55] Μητροπούλου Δέσποινα, Συγκριτική Μελέτη διατάξεων Υποσταθμών Μεταφοράς Υ.Τ/ Μ.Τ και ΚΥΤ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ιούλιος 2010
- [56] Ν. Ανδρίτσος, Ενέργεια και Περιβάλλον, Διδακτικές σημειώσεις τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Οκτώβριος 2008
- [57] Νικολάου Ελευθέριος, Ανάπτυξη αλγορίθμου για την διαστασιολόγηση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Οκτώβριος 2015
- [58] Ντένα Όλγα, Έλεγχος Στρεφόμενης Αποθήκης Ενέργειας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ιούλιος 2011
- [59] Οικονομόπουλος Κωνσταντίνος, Υπολογισμός Ηλεκτρικού και Μαγνητικού Πεδίου στο Περιβάλλον Γραμμών Μεταφοράς Μέσης Τάσης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Οκτώβριος 2012
- [60] Οικονόμου Λάμπρος, Ανάπτυξη Μεθοδολογιών για τον υπολογισμό της κεραυνικής συμπεριφοράς και τη σχεδίαση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Μάρτιος 2006
- [61] Ορφανός Γεώργιος, Επέκταση δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο αποσύνθεσης Benders, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Σεπτέμβριος 2006
- [62] Παναγιώτης Μουτής, Η συμβολή των Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών-Μεταβλητού Βήματος στην Πρωτεύουσα Ρύθμιση Φορτίου-Συχνότητας, Αθήνα, Νοέμβριος 2007
- [63] Παπαδιά Β., Βουρνάς. Κ, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και τάσεως, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [64] Παπαδιάς Β.Κ, Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, Εκδόσεις Συμμετρία, 1999
- [65] Παπαδόπουλος.Μ, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1997
- [66] Παπαϊωάννου Γρηγόριος, Βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας θερμικών μονάδων παραγωγής με ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας και παραγόμενων ρύπων, Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Μάρτιος 2014
- [67] Πασχαλίδου Πασχαλίνα, Συγκριτική μελέτη των διαφορετικών μεθόδων και τεχνολογιών για την παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

- [68] Παυλίδου Ελένη, Συμμετοχή Ανεμογεννήτριας Αιολικού Πάρκου Υπο Αποκοπή στη ρύθμιση Φορτίου Συχνότητας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Μάρτιος 2010
- [69] Ροδόπουλος Φώτης, Μεθοδολογία Τεχνο-Οικονομικής Αξιολόγησης Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων, Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Ιούνιος 2005
- [70] Σκαράκη Δήμητρα – Φουρνιανάκης Γιάννης, Μικροδίκτυα και Έξυπνα Δίκτυα, Πολυτεχνείο Κρήτης – ΜΠΔ, Φεβρουάριος 2013
- [71] Σπύρος Μιχαλόπουλος, Χαρακτηριστικά Αιολικής και Φωτοβολταϊκής παραγωγής, Πολυτεχνείο Κρήτης-ΜΠΔ, Φεβρουάριος 2013
- [72] Σταύρος Παπαθανασίου Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Εκδόσεις ΕΜΠ Αθήνα 2008
- [73] Στυλιανοπούλου Κωνσταντίνα- Εμμανουέλλα Χατζηρόδου, «Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ελληνικό ηλεκτρικό δίκτυο», ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Οκτώβριος 2009
- [74] Τάγκας Νικόλαος, Μοντελοποίηση Διεσπαρμένης Παραγωγής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, (Ιανουάριος 2008)
- [75] Τάσσιου Ι., Αποτίμηση του ρόλου των αποθηκευτικών διατάξεων σε συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (2005)
- [76] Τεντζεράκης Σωκράτης, Συμβολή στην ανάπτυξη ολοκληρωμένης μεθοδολογίας εκτίμησης εκπομπών αρμονικών από ανεμογεννήτριες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Σεπτέμβριος 2013
- [77] Τράκας Δημήτριος, Επιπτώσεις της Αιολικής Διείσδυσης στην Ασφάλεια και Αξιοπιστία Λειτουργίας Απομονωμένων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Οκτώβριος 2009
- [78] Τσούτσος Θ., Κανάκης Ι. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παπασωτηρίου 2013
- [79] Φίλος Γεώργιος, Σχεδιασμός Ανάπτυξης δικτύου Διασύνδεσης νέων έργων ΑΠΕ με το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση Ευρετικών Αλγορίθμων, Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Ιούλιος 2014
- [80] Φραγκιουδάκη Μαρία - Λεμενιτάκης Χαρίλαος, Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων – Χαρακτηριστικά, Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Φεβρουάριος 2013
- [81] Χαλεβίδης Κωνσταντίνος, Διηλεκτρικά και θερμικά φαινόμενα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής, , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Οκτώβριος 2012
- [82] Χατζής Γεώργιος, Εφαρμογή Τεχνολογίας W-BPL σε γραμμή MT με Φωτοβολταϊκή Παραγωγή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Φεβρουάριος 2012

