

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1537

"ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ"

Χέλμης Επαμεινώνδας ΑΜ 4676

ΕΠΟΠΤΕΥΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: Δημητρακάκης Γεώργιος
: Καλαντζόπουλος Αθανάσιος

ΠΑΤΡΑ 2017

Πρόλογος/Περίληψη

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας, είναι η μελέτη και παρουσίαση των τύπων, αρχών λειτουργίας αλλά και εφαρμογών των ηλεκτρικών γεννητριών σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Αρχικά, πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Γίνεται μία ποιοτική περιγραφή των όρων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς και των γραμμών τάσης HVDC (High - Voltage Direct Current), ενώ επιπλέον γίνεται αναφορά στην πυρηνική ενέργεια, αλλά και στις βασικότερες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Εξετάζεται η λειτουργία ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών συστημάτων, μικρών υδροηλεκτρικών έργων, θερμικών σταθμών με γεωθερμικό ρευστό ως πρώτη ύλη καθώς και τεχνολογίες που αφορούν τη χρήση των παραγώγων της βιομάζας (βιοαέριο), της κινητικής ενέργειας των κυμάτων και της ενέργειας των παλιρροιών. Επιπλέον, πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των αντιστροφών και παρουσιάζονται σύγχρονες τεχνολογίες για την παραγωγή ενέργειας. Η εργασία συνεχίζεται με την παράθεση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, τόσο σύγχρονων όσο και ασύγχρονων γεννητριών που χρησιμοποιούνται στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συστήματα ελέγχου των γεννητριών και ο τρόπος σύνδεσής τους με το δίκτυο. Η εργασία ολοκληρώνεται με τα κύρια συμπεράσματα ενώ γίνεται και παράθεση προτάσεων για τη βελτίωση του τρόπου λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών. Η τρέχουσα μελέτη αποτελεί βιβλιογραφική επισκόπηση του θέματος. Τα δευτερογενή στοιχεία αντλούνται τόσο από την Ελληνική όσο και από την ξενόγλωσση βιβλιογραφία, ενώ ως πηγές χρησιμοποιούνται βιβλία, άρθρα και άλλες δημοσιεύσεις και μελέτες που παρουσιάζονται σε ηλεκτρονική μορφή.

Η χρησιμότητα της εργασίας πηγάζει από το γεγονός ότι αποτελεί μια δευτερογενή μελέτη της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος «χθες, σήμερα και αύριο». Τα αποτελέσματα αναμένεται να αναδείξουν μια ολοκληρωμένη εικόνα αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών και υπό αυτή την έννοια είναι χρήσιμα αφού μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντικές έρευνες με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας, της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Μετά το πέρας της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημητρακάκη Γεώργιο για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη διαρκή υποστήριξη και τις γόνιμες παρατηρήσεις του, όπως επίσης και τον κ. Καλαντζόπουλο Αθανάσιο για τις οξυδερκείς συμβουλές του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της τριμελούς επιτροπής για τη συνεισφορά τους, στην αξιολόγηση της διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος/Περίληψη	ii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	1_Toc480939539
1.1 Συνεχές (DC) και εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα	1
1.1.1 Ορισμοί και Ιστορική αναδρομή.....	1
1.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	2
1.2 Γραμμέζτάσης HVDC (High-Voltage Direct Current)	3
1.2.1 Ορισμός και Ιστορική αναδρομή	3
1.2.2 Δομή συστήματος	4
1.3 Πυρηνική ενέργεια	6
1.3.1 Τύποι αντιδραστήρων	7
1.3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	7
1.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	8
1.4.1 Αιολική ενέργεια.....	9
1.4.2 Ηλιακή ενέργεια.....	11
1.4.3 Γεωθερμική ενέργεια	15
1.4.4 Βιομάζα.....	17
1.4.5 Ωκεάνια ενέργεια	18
1.4.6 Υδροδυναμικό.....	19
1.5 Αντιστροφείς (Inverters)	19
1.5.1 Λειτουργία αντιστροφέων.....	20
1.5.2 Μονοφασικοί αντιστροφείς	21
1.5.3 Τριφασικοί αντιστροφείς	22
1.5.4 Αντιστροφείς ελεγχόμενοι με την μέθοδο διαμόρφωσης Παλμών (PWM).....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Γεννήτριες	23
2.1 Είδη γεννητριών	23
2.1.1 Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος	23
2.1.2 Γεννήτριες Εναλλασσόμενου Ρεύματος	25
2.1.2.1 Σύγχρονες γεννήτριες	25
2.1.2.2 Ασύγχρονες γεννήτριες	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.Συστήματα Ελέγχου και Προστασίας Γεννητριών.....	37
3.1 Προστασία γεννήτριας	37
3.1.1 Προστασίες στάτη.....	38
3.1.1.1 Διαφορική προστασία.....	38

3.1.1.2	Δευτερεύουσα προστασία (Backup protection)	39
3.1.1.3	Προστασία στάτη έναντι σφαλμάτων γης (Stator ground-fault protection) 39	
3.1.1.4	Προστασία υπέρτασης (Overvoltage protection)	39
3.1.1.5	Προστασία υπότασης (Undervoltage protection).....	40
3.1.1.6	Προστασία ισχύος αντίστροφης φοράς (Reverse power protection) ..	40
3.1.1.7	Προστασία από ρεύματα αρνητικής ακολουθίας (Negative-sequence current protection).....	40
3.1.1.8	Προστασία έναντι ακούσιας ενεργοποίησης (Inadvertent energization protection).....	41
3.1.1.9	Προστασία υπερβολικής ροής (Volts/Hertz Protection)	41
3.1.1.10	Προστασία έναντι απαράδεκτης συχνότητας (Abnormal frequency protection).....	41
3.1.1.11	Προστασία έναντι απώλειας συγχρονισμού (Loss of synchronism protection).....	42
3.1.2	Προστασίες δρομέα	42
3.1.2.1	Προστασία δρομέα έναντι σφαλμάτων γης στο κύκλωμα διέγερσης (Field ground protection).....	42
3.1.2.2	Προστασία έναντι απώλειας πεδίου διέγερσης (Loss of field protection) 42	
3.1.3	Προστασίες έναντι μηχανικών καταπονήσεων.....	42
3.1.3.1	Προστασία υπερθέρμανσης στάτη (Thermal overload protection)	42
3.1.3.2	Προστασία υπερτάχυνσης (Overspeeding protection)	43
3.1.3.3	Προστασία απώλειας κενού συμπυκνωτή (Loss of condenser vacuum)	43
3.2	Έλεγχος γεννήτριας.....	43
3.2.1	Ελεγκτές τάσης	44
3.2.1.1	Αυτόματος ρυθμιστής τάσης	44
3.2.1.2	Μοντέλο Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης με διεγέρτρια Συνεχούς Ρεύματος	45
3.2.1.3	Μοντέλο Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης με διεγέρτρια Εναλλασσόμενου Ρεύματος	45
3.2.1.4	Μοντέλο Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης με Διεγέρτρια Στατικού Τύπου	46
3.2.2	Ελεγκτές συχνότητας	46
3.2.2.1	Σταθεροποιητές Συστήματος Ισχύος	46
3.2.3	Έλεγχος στροφών γεννήτριας.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Συμπεράσματα		49
Βιβλιογραφία.....		51
_Toc480939598		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας. Χθες, Σήμερα, Αύριο

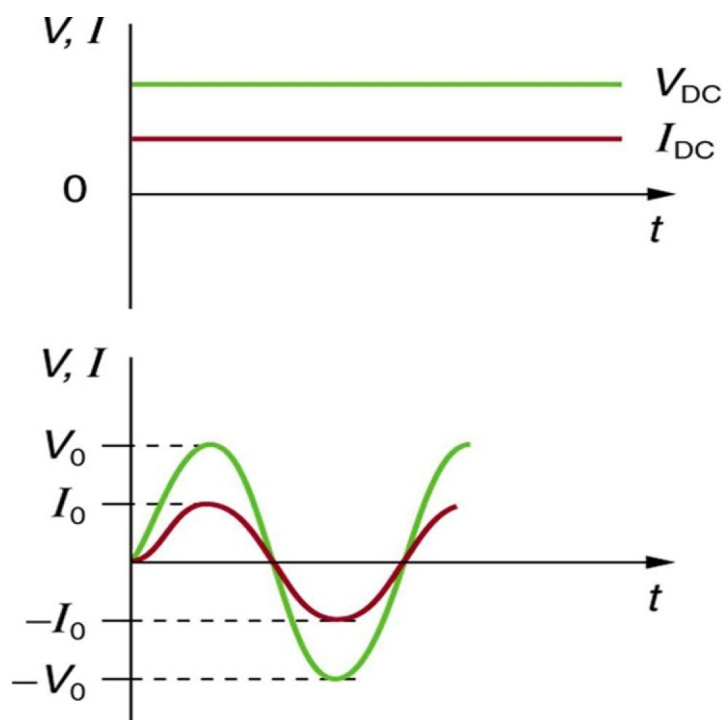
1.1 Συνεχές (DC) και εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα

1.1.1 Ορισμοί και Ιστορική αναδρομή

Η γέννηση των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης προέκυψε με την σχεδόν ταυτόχρονη θεμελίωση από τους Michael Faraday και Joseph Henry των αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού το 1831. Στη συνέχεια, το 1888, κατασκευάστηκαν βάσει των αρχών αυτών οι πρώτοι ηλεκτρικοί κινητήρες, με τους Thomas Edison και Nikola Tesla να έχουν μια επιστημονική διαμάχη υποστηρίζοντας την μηχανή συνεχούς ρεύματος και την μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος αντίστοιχα. Η μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος τελικά επικράτησε, καθώς το κύριο μειονέκτημα του συνεχούς ρεύματος ήταν ότι δεν μπορούσε να μεταδώσει ισχύ σε μεγάλες αποστάσεις. Αντιθέτως, το εναλλασσόμενο ρεύμα μπορούσε να μετασχηματιστεί και να μεταφερθεί εύκολα.

Αναλυτικότερα, σε ότι αφορά τα κύρια χαρακτηριστικά τους, το συνεχές ρεύμα είναι το ηλεκτρικό ρεύμα που έχει μία συγκεκριμένη φορά και σταθερό μέτρο έντασης. Τα περισσότερα κυκλώματα ευρείας χρήσης (μικρά ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά κυκλώματα) λειτουργούν με συνεχές ρεύμα. Επειδή έχει σταθερή ένταση, υποχρεωτικά παράγεται από σταθερή τάση, δεδομένου ότι το κύκλωμα δεν αλλάζει σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Όταν απεικονίζεται διαγραμματικά, η τάση συνεχούς ρεύματος συναρτήσει του χρόνου εμφανίζεται ως ευθεία γραμμή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.

Εναλλασσόμενο ρεύμα, από την άλλη, είναι το ρεύμα στο οποίο εναλλάσσεται η φορά του περιοδικά με το χρόνο. Στην ενεργειακή θεώρηση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σημασία έχουν μόνο τα ημιτονοειδή μεγέθη, υπό μονοφασική ή τριφασική μορφή. Βέβαια στην πράξη οι παραγόμενες τάσεις, ρεύματα και μαγνητικές ροές δεν είναι καθαρά ημιτονοειδείς, αλλά περιέχουν εκτός της βασικής αρμονικής και υψηλότερες αρμονικές, των οποίων η συχνότητα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της βασικής συχνότητας. Η ενεργός τιμή ρεύματος χαρακτηρίζει το θερμικά ισοδύναμο μέγεθος συνεχούς ρεύματος. Δηλαδή, ως ενεργός τιμή ορίζεται η ένταση του συνεχούς ρεύματος, που προκαλεί σε μια ωμική αντίσταση τα ίδια θερμικά αποτελέσματα με το εναλλασσόμενο ρεύμα.



Σχήμα 1.1: Συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα μέσα από μια αντίσταση

1.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Το βασικότερο πλεονέκτημα του εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι του συνεχούς, είναι η δυνατότητα που προσφέρει για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω των γραμμών υψηλής τάσης. Σήμερα, οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας μεγάλων αποστάσεων λειτουργούν με τάσεις άνω των 300.000 Volts, με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια ισχύος. Χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές, είναι εύκολο να ανυψωθεί η τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος σε αυτά τα υψηλά επίπεδα. Το επόμενο βασικό πλεονέκτημα του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ο τρόπος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, μια από τις σημαντικότερες εφευρέσεις στα τέλη του 19^{ου} αιώνα ήταν η γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Η ενέργεια συνεχούς ρεύματος παράγεται από μπαταρίες, ηλιακά κύτταρα, κύτταρα καυσίμου, ή με μετατροπή από AC σε DC. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η απλότητα κατασκευής και λειτουργίας των κινητήρων AC σε σχέση με τους κινητήρες DC. Επιπρόσθετα, τα σύγχρονα φωτιστικά και κυρίως τα φώτα φθορισμού χρησιμοποιούν ένα αέριο, όπως αργό ή ατμούς υδραργύρου, που διεγείρεται από την παρουσία ρεύματος υψηλής τάσης. Για διάφορους πρακτικούς λόγους, το εναλλασσόμενο ρεύμα είναι η καλύτερη επιλογή για το σχεδιασμό και τη λειτουργία των λαμπτήρων φθορισμού σε σχέση με το συνεχές. Με τη σημερινή συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού, η ανάγκη για εναλλασσόμενο ρεύμα είναι ακόμα μεγαλύτερη [20].

Συμπερασματικά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος είναι φθηνότερη από την παραγωγή με συνεχές. Τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος είναι πιο απλά, στιβαρά και δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες δυσκολίες επισκευής και συντήρησης, κατά τη

διάρκεια της χρήσης τους. Το εναλλασσόμενο ρεύμα μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε συνεχές με τη βοήθεια των ανορθωτών. Τέλος, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος σε μεγάλες αποστάσεις γίνεται σε πολύ υψηλές τάσεις. Ως αποτέλεσμα αυτού, οι απώλειες είναι πολύ μικρότερες σε σύγκριση με αυτές που υπάρχουν κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος [10].

Παρά την επικράτηση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος, υπάρχουν τεχνικοί λόγοι που επιβάλλουν περιορισμούς στη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος με εναλλασσόμενο ρεύμα. Ειδικότερα, τα καλώδια έχουν πολύ μεγάλη χωρητικότητα σε σχέση με τις κλασσικές γραμμές μεταφοράς. Έτσι, όταν η μεταφορά ενέργειας γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα τα χωρητικά ρεύματα διαρροής που δημιουργούνται και οι απώλειες που τα συνοδεύουν καθιστούν απαγορευτική ακόμα και για αποστάσεις της τάξεως των 50 km, την μεταφορά ισχύος με AC ρεύμα. Η χρήση άεργων αντισταθμιστών αυξάνει δραματικά το κόστος και είναι δύσκολα εφαρμόσιμη σε περιπτώσεις υποβρύχιων καλωδίων [18].

Επίσης, η ανάγκη για διατήρηση της ευστάθειας επιβάλλει έναν πολύ σημαντικό περιορισμό ως προς την απόσταση, μέχρι την οποία μπορεί να μεταφερθεί η ισχύς, με εναλλασσόμενο ρεύμα. Όσο αυξάνει η απόσταση μεταφοράς και συνεπώς το μήκος της γραμμής μεταφοράς, τόσο μεγαλώνει και η χωρητικότητα της γραμμής με αποτέλεσμα τη μείωση του πόσου ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί υπό τη μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος. Τέλος, η μεταφορά με εναλλασσόμενο ρεύμα ανάμεσα σε δυο διασυνδεδεμένα συστήματα είναι δυνατή μόνο όταν τα συστήματα αυτά έχουν την ίδια ονομαστική συχνότητα και λειτουργούν συγχρονισμένα [20].

1.2 Γραμμές τάσης HVDC (High-Voltage Direct Current)

1.2.1 Ορισμός και Ιστορική αναδρομή

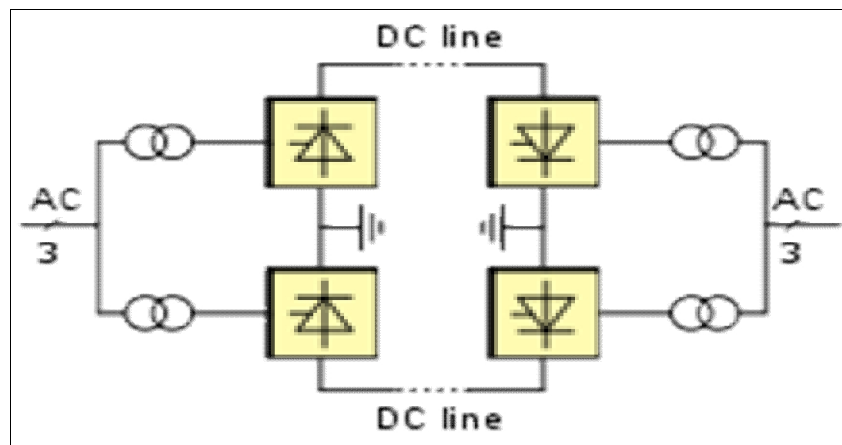
Έχει τεκμηριωθεί ευρέως στην ιστορία της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας, ότι στα πρώτα ηλεκτρικά συστήματα χρησιμοποιήθηκε συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα. Το πρώτο πλήρες ηλεκτρικό σύστημα που δημιουργήθηκε και εγκαταστάθηκε από τον Thomas Edison, ήταν ένα σύστημα συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, αυτά τα συστήματα γρήγορα αντικαταστάθηκαν με τα συστήματα τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων τα οποία διαθέτουν και που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Εκτός από τα πλεονεκτήματα όμως, υφίστανται και αρκετά μειονεκτήματα που αφορούν τα καλώδια μεταφοράς, τη διατήρηση της ευστάθειας και το συγχρονισμό των συστημάτων. Με στόχο την επίλυση των εν λόγω προβλημάτων, προσφέρεται ως εναλλακτική λύση η μεταφορά ρεύματος υψηλής τάσης με DC συστήματα και συνεπώς γίνεται λόγος για συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC) [21].

Αναλυτικότερα, τα συστήματα ισχύος υψηλής τάσης με διασύνδεση συνεχούς ρεύματος αποτελούν μια τεχνολογία ηλεκτρονικών ισχύος, τα οποία χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος για να επιτελέσουν συγκεκριμένες λειτουργίες. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα για την μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος, σε αντίθεση με τα κοινά συστήματα μεταφοράς ισχύος που χρησιμοποιούν συνήθως, εναλλασσόμενο ρεύμα.

Αποτελούν έναν ευέλικτο και αποτελεσματικό τρόπο για την μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, τόσο με εναέριες, όσο και με υπόγειες ή υποβρύχιες γραμμές μεταφοράς [21].

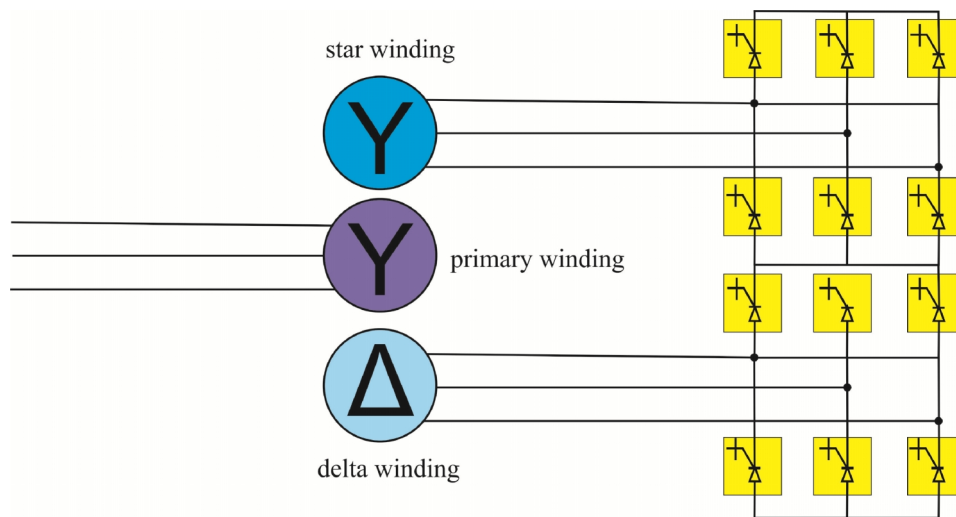
1.2.2 Δομή συστήματος

Σε ένα HVDC σύστημα, η ηλεκτρική ενέργεια λαμβάνεται από ένα τριφασικό AC δίκτυο και μετατρέπεται σε DC με τη βοήθεια ενός σταθμού μετατροπής. Έπειτα, μεταφέρεται μέσω των HVDC αγωγών (ενδέχεται να είναι μόνο ένας αγωγός και το ρόλο του δεύτερου να τον παίζει η γη) στο σημείο λήψης και τελικά μετατρέπεται πάλι σε AC με τη βοήθεια ενός σταθμού μετατροπής, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε AC δίκτυο. Στα άκρα κάθε HVDC συστήματος μεταφοράς υπάρχουν οι σταθμοί μετατροπής του συστήματος [21].



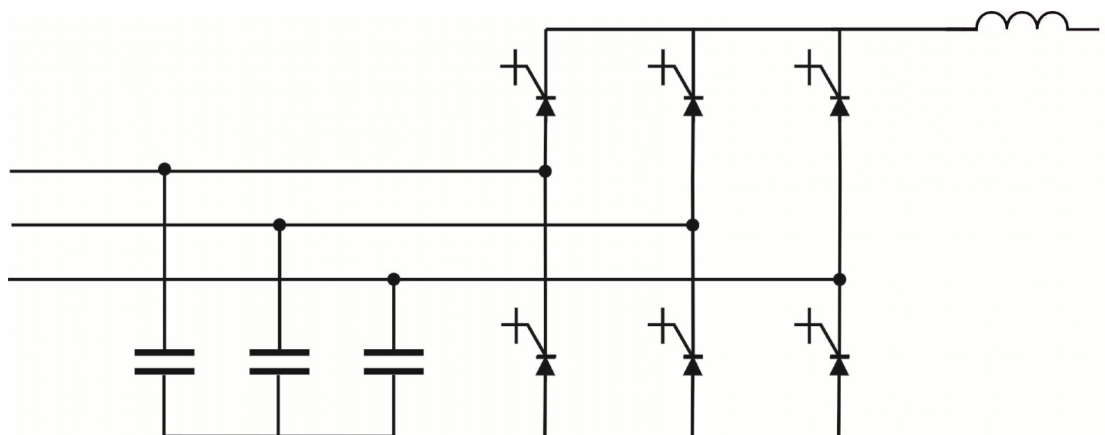
Σχήμα 1.2: Διάγραμμα συστήματος HVDC

Οι μετατροπείς αποτελούν το βασικότερο μέρος ενός HVDC συστήματος. Σε αυτούς γίνεται η μετατροπή της υψηλής τάσης από AC σε DC και αντίστροφα χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές ημιαγωγικές βαλβίδες υψηλής τάσης. Ο έλεγχος, πραγματοποιείται μέσω ειδικού λογισμικού εγκατεστημένου σε υπολογιστές. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της μεταφερόμενης ισχύος και αποτελεί μοναδικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας HVDC. Η τριφασική εξαπαλμική γέφυρα αποτελεί τη βασική μονάδα των μετατροπέων. Σημειώνεται ωστόσο, ότι σήμερα, χρησιμοποιείται πιο πολύ η τριφασική γέφυρα 12 παλμών, που κατασκευάζεται από δυο εξαπαλμικές γέφυρες συνδεδεμένες σε σειρά στην DC πλευρά τους, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3 [21].



Σχήμα 1.3: Τριφασική γέφυρα 12-παλμών

Στα κλασικά συστήματα HVDC χρησιμοποιούνται μετατροπείς φυσικής μεταγωγής, οι οποίοι εμπεριέχουν συστοιχίες διακοπτικών στοιχείων. Το διακοπτικό στοιχείο είναι ένας ελεγχόμενος ημιαγωγικός διακόπτης, ο οποίος μπορεί να αντέξει σε αρκετά υψηλά ρεύματα (4000 A) και είναι ικανός να διακόψει πολύ υψηλές τάσεις (μέχρι 10kV). Η μονάδα των διακοπτικών στοιχείων λειτουργεί υπό την συχνότητα του δικτύου (50Hz ή 60Hz) και είναι δυνατός ο έλεγχος του επιπέδου της παραγόμενης AC τάσης, μέσω του ελέγχου της γωνίας έναυσης των διακοπτικών στοιχείων. Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί λεπτομερής, γρήγορος και αποτελεσματικός έλεγχος της ροής της μεταφερόμενης ισχύος. Υπάρχουν επίσης και οικογένειες μετατροπέων, όπου η μεταγωγή γίνεται μέσω πυκνωτών. Σε αυτούς παρεμβάλλονται πυκνωτές μεταξύ των μετασχηματιστών και των μετατροπέων (Cascaded Cell DC-DC Converter - CCC), όπως γίνεται εμφανές από το Σχήμα 1.4 [21].



Σχήμα 1.4: Μετατροπέας CCC

Βασικό μέρος του συστήματος HVDC αποτελούν και οι μετασχηματιστές, που συνδέουν το AC δίκτυο με τις γέφυρες και ρυθμίζουν κατάλληλα το επίπεδο της εναλλασσόμενης τάσης. Οι μετασχηματιστές μπορεί να είναι διαφορετικού τύπου και σχεδιασμού, ανάλογα με τη μεταφερόμενη ισχύ και τις απαιτήσεις της μεταφοράς. Οι μετατροπείς HVDC παράγουν

αρμονικά ρεύματα στην AC πλευρά του συστήματος, τα όποια ωστόσο περιορίζονται από τα AC φίλτρα και δεν εισέρχονται στο AC δίκτυο, κατά τη λειτουργία του μετατροπέα. Τα AC φίλτρα συνήθως συντονίζονται για την 11^η, 13^η, 23^η και 25^η αρμονική σε γέφυρα 12-παλμών, περιορίζοντας αυτά τα αρμονικά ρεύματα. Σε περίπτωση που ο σταθμός μετατροπής συνδέεται σε DC σύστημα με εναέριες γραμμές μεταφοράς, κρίνεται απαραίτητη η χρήση DC φίλτρων στην DC πλευρά. Οι αρμονικές τάσης που παράγονται από γέφυρα 6-παλμών είναι 6^{ης} τάξης και αντίστοιχα από γέφυρα 12-παλμών είναι 12^{ης} τάξης. Τα DC φίλτρα περιορίζουν την κυμάτωση στην τάση εξόδου, ενώ το DC ρεύμα εξομαλύνεται κυρίως από τις επαγωγές εξομάλυνσης, που συνήθως περιλαμβάνονται σε κάθε πόλο του σταθμού μετατροπής και συνδέονται σε σειρά στην έξοδο των μετατροπέων που υπάρχουν [21].

Τα καλώδια στα HVDC συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για υποβρύχια μεταφορά ισχύος, ενώ δεν υπόκεινται σε περιορισμούς απόστασης. Σε περίπτωση που το HVDC σύστημα χρησιμοποιείται για την μεταφορά ισχύος μεταξύ συστημάτων σε μεγάλη απόσταση, χρησιμοποιούνται εναέριες γραμμές μεταφοράς, αν και περιβαλλοντικοί λόγοι, επιβάλλουν πολλές φορές τη χρήση καλωδίων και για επίγειες συνδέσεις.

1.3 Πυρηνική ενέργεια

Από το 1951, που αρχίζει η λειτουργία του πρώτου πυρηνικού αντιδραστήρα έως και σήμερα, έχουν γίνει πολλά βήματα στον τομέα της τεχνολογίας των πυρηνικών αντιδραστήρων, όχι όμως τέτοια που να έχουν καταστήσει την ατομική ενέργεια μια ασφαλή και οικονομική μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά για να γίνει αυτό πρέπει πρώτα να απελευθερωθεί. Η απελευθέρωση γίνεται μέσω της επέμβασης στον πυρήνα ενός ατόμου, διαδικασία που πραγματοποιείται είτε με σχάση, είτε με σύντηξη. Το αποτέλεσμα είναι μία μη ελεγχόμενη απελευθέρωση ενέργειας, ή μία ελεγχόμενη απελευθέρωση θερμικής ενέργειας. Η αντίδραση που χρησιμοποιούν έως και σήμερα οι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι η πυρηνική σχάση [25].

1.3.1 Τύποι αντιδραστήρων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αντιδραστήρων. Οι πιο διαδεδομένοι από αυτούς είναι οι εξής:

- **BWR - Boiling Water Reactors (Αντιδραστήρες Ατμού).** Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των αντιδραστήρων είναι η απλή κατασκευή τους, λόγω του ότι διαθέτουν ένα μόνο θερμικό κύκλο. Αυτό σημαίνει ότι το νερό που χρησιμοποιείται στον αντιδραστήρα ως ψυκτικό, ατμοποιείται μέσα στον αντιδραστήρα και χρησιμοποιείται κατευθείαν για την κίνηση του ατμοστρόβιλου. Λόγω της απλής κατασκευής τους, έχουν σχετικά μικρό κόστος κατασκευής.
- **PWR- Pressurized Water Reactors (Αντιδραστήρες Πεπιεσμένου Ύδατος).** Χαρακτηρίζονται σαν αντιδραστήρες συμβατικής σχεδίασης και είναι σε θέση να αναπαράγουν μεγάλο μέρος από τα καύσιμα που χρησιμοποιούν. Η λειτουργία

τους γίνεται με διπλό θερμικό κύκλο. Στον πρώτο κύκλο το νερό ψύχει τον πυρήνα, χωρίς να φτάνει σε σημείο βρασμού λόγω της υψηλής πίεσης και στον δεύτερο κύκλο παράγεται ο ατμός. Το νερό εκτελεί και τον ρόλο του επιβραδυντή νετρονίων.

- **LMR- Liquid Metal Reactors (Αντιδραστήρες Υγρού Μετάλλου).** Αυτός ο τύπος αντιδραστήρων μεταστοιχειώνει το φυσικό ουράνιο (U_{238}) σε πλουτόνιο (Pu_{238}). Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η υψηλή απόδοση. Τα υψηλά επίπεδα ενέργειας των ταχέων νετρονίων, που παράγονται κατά την σχάση προκαλούν τον ταχύτατο εκφυλισμό τους. Ο συγκεκριμένος τύπος αντιδραστήρα παράγει 70 φορές περισσότερη ενέργεια με την ίδια ποσότητα καυσίμου, από ότι οι αντίστοιχοι αντιδραστήρες συμβατικής τεχνολογίας.
- **CANDU Reactors.** Οικογένεια αντιδραστήρων καναδικού σχεδιασμού με καύσιμο φυσικό ουράνιο και επιβραδυντή βαρύ ύδωρ.
- **Gas Cooled Reactors και Advanced Gas Cooled Reactors.** Αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν για ψυκτικό διοξείδιο του άνθρακα.
- **RBMK Reactors.** Αντιδραστήρες με επιβραδυντή γραφίτη. Λειτουργούν με παρόμοια τρόπο όπως οι Αντιδραστήρες Ατμού.
- **VVER Reactor:** Είναι η Ρωσική εκδοχή του Αντιδραστήρα Πεπιεσμένου Ύδατος.

1.3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Το κυριότερο πλεονέκτημα που προκύπτει από τη χρήση ατομικής ενέργειας αφορά τη μη έκλυση ρύπων στην ατμόσφαιρα, αν και έρευνες περιβαλλοντικών οργανώσεων δείχνουν αυξημένη θερμική ενέργεια στις περιοχές όπου λειτουργούν πυρηνικά εργοστάσια. Για παράδειγμα, η σχάση ενός πυρήνα ουρανίου 235 παράγει τόση ενέργεια, όση δύο τόνοι κάρβουνο σε ένα κλασσικό σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας. Η ασφαλής λειτουργία ενός σταθμού πυρηνικής ενέργειας, ωστόσο αποτελεί μια τεράστια πρόκληση αφού υπάρχουν σημαντικοί κίνδυνοι εκρήξεων και διαρροής ραδιενέργειας. Η ασφάλεια ενός πυρηνικού αντιδραστήρα βασίζεται, σε μια αρχή που λέγεται «άμυνα σε βάθος». Αντικειμενικός στόχος της είναι η μείωση των πιθανών ατυχημάτων τα οποία θα μολύνουν το εργατικό δυναμικό, το περιβάλλον, ακόμα και τον πληθυσμό των χωρών στους οποίους είναι εγκατεστημένοι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες. Μια από τις μεθόδους προστασίας, που χρησιμοποιείται ευρύτατα είναι η δημιουργία «ασπίδων» προστασίας μεταξύ της καρδιάς του πυρηνικού αντιδραστήρα και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η πρώτη «ασπίδα» αποτελείται από αεροστεγές μέταλλο, μέσα στο οποίο είναι σφραγισμένοι οι ράβδοι του καυσίμου. Η δεύτερη «ασπίδα» αποτελείται από μια δεξαμενή πάχους 20 εκατοστών, η οποία είναι γεμάτη με νερό και σκεπάζεται με ένα βαρύ μολύβι. Η τρίτη «ασπίδα» αποτελείται από τους τσιμεντένιους τοίχους, του κτιρίου του αντιδραστήρα, που έχουν σχεδιαστεί καταλλήλως, ώστε να αντέχουν σε εξωτερικές διαταραχές, όπως για παράδειγμα ένας μεγάλος σεισμός. Κάθε χώρα που έχει αναπτύξει πυρηνική βιομηχανία, αντιμετωπίζει ένα πολύ λεπτό πρόβλημα: Πώς να διαθέσει τους τόνους

ραδιενεργών αποβλήτων που συνεχίζουν να συσσωρεύονται. Πρόβλημα το οποίο παραμένει άλυτο ακόμα και σήμερα [25].

1.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ανάπτυξη και εκμετάλλευση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) που υποκαθιστούν τις καθιερωμένες ενεργειακές πηγές (ορυκτά καύσιμα), πολλές από τις οποίες εξαντλούνται ταχύτατα, αποτελεί το βασικό στοιχείο της ενεργειακής πολιτικής των τεχνολογικά ανεπτυγμένων χωρών.

Θεωρώντας την έγχυση ηλεκτρικής ενέργειας στο Ελληνικό εθνικό δίκτυο από μικρούς παραγωγούς, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (σύμφωνα με τον Ν 2773/1999) είναι η Ηλεκτρική Ενέργεια προερχόμενη από (ΥΠΕΚΑ, 2015):

1. Την εκμετάλλευση Αιολικής ή Ηλιακής Ενέργειας ή βιομάζας ή Βιοαερίου.
2. Την εκμετάλλευση Γεωθερμικής Ενέργειας, εφόσον το δικαίωμα εκμετάλλευσης του σχετικού Γεωθερμικού Δυναμικού έχει παραχωρηθεί στον ενδιαφερόμενο, σύμφωνα με τις ισχύουσες κάθε φορά διατάξεις.
3. Την εκμετάλλευση της Ενέργειας από την Θάλασσα.
4. Την εκμετάλλευση Υδάτινου Δυναμικού με Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς.
5. Το συνδυασμό των ανωτέρω.
6. Τη Συμπαράγωγή, με χρήση των Πηγών Ενέργειας, των (1) και (2) και το συνδυασμό τους.

Η Ελλάδα είναι μια χώρα ιδιαίτερα προικισμένη όσον αφορά τις ΑΠΕ, οι οποίες περιλαμβάνουν την ηλιακή και αιολική ενέργεια, την υδάτινη ενέργεια στην ξηρά (μικρά υδροηλεκτρικά), τη βιομάζα αλλά και τη γεωθερμία. Παρά το γεγονός ότι η Ελλάδα είναι πλούσια σε όλες τις παραπάνω ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αξιοποίηση τους παραμένει ακόμα σε εμβρυακό στάδιο, συγκρινόμενη με άλλες χώρες αλλά και με αυτές τις ίδιες τις δυνατότητες της χώρας. Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την επίτευξη της συμβολής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% έως το 2020, απορρέει από την Οδηγία 2009/28/ΕΚ και περιλαμβάνει εκτιμήσεις για την εξέλιξη του ενεργειακού τομέα και τη διεύθυνση των τεχνολογιών των ΑΠΕ έως το 2020. Οι εκτιμήσεις αυτές εξειδικεύονται στη συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ψύξης κυρίως για τον οικιακό τομέα, αλλά και στη χρήση βιοκαυσίμων στον τομέα των μεταφορών. Μέσα σε αυτό, αναφέρονται μέτρα για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της αξιοποίησης των ΑΠΕ, καθώς και στοιχεία για τις βασικές διοικητικές δομές που θα επιταχύνουν τη διεύθυνση αυτή. Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης, μετά τις πιθανές βελτιώσεις που θα προέλθουν από τη διαβούλευση με την Ευρωπαϊκή Ένωση, θα αποτελέσει τη βάση για τη σύνταξη σχετικής Υπουργικής Απόφασης για τη διεύθυνση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας. Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης και η πρόοδος στην εφαρμογή του θα εξετάζεται ανά δύο χρόνια και θα επικαιροποιείται, ώστε να λαμβάνονται

υπόψη οι εξελίξεις της αγοράς και της βελτίωσης των τεχνολογιών, αλλά και η ζήτηση της ενέργειας [29].

Ειδικότερα, για το σύνολο των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020, προβλέπεται:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/EK
- 20% διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/EK
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση [29].

1.4.1 Αιολική ενέργεια

Οι πάσης φύσεως μηχανές που κινούνται με την βοήθεια του ανέμου δύνανται να αποτελέσουν μια οικονομική πηγή παροχής ανανεώσιμης ενέργειας. Μικρά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (από ένα W έως και μερικά kW) με τη βοήθεια του ανέμου χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία απομακρυσμένων περιοχών που δεν είναι συνδεδεμένες με το εθνικό δίκτυο, ενώ μεγάλα συστήματα (από 50kW και πάνω) έχουν εισαχθεί στο εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο πληθώρας χωρών. Όσο αφορά τη συνολική παραγωγή της Αιολικής Ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Γερμανία και η Ισπανία παράγουν πάνω από το 50% του συνόλου αυτής. Αντίστοιχα, σε επίπεδο συμμετοχής της Αιολικής Ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή, δύο άλλες, μικρότερες χώρες κατέχουν τις πρώτες θέσεις, η Δανία και η Πορτογαλία, με την Ισπανία να κατέχει την 3η θέση, την Ισλανδία την 4η και τη Γερμανία την 5η θέση [8].

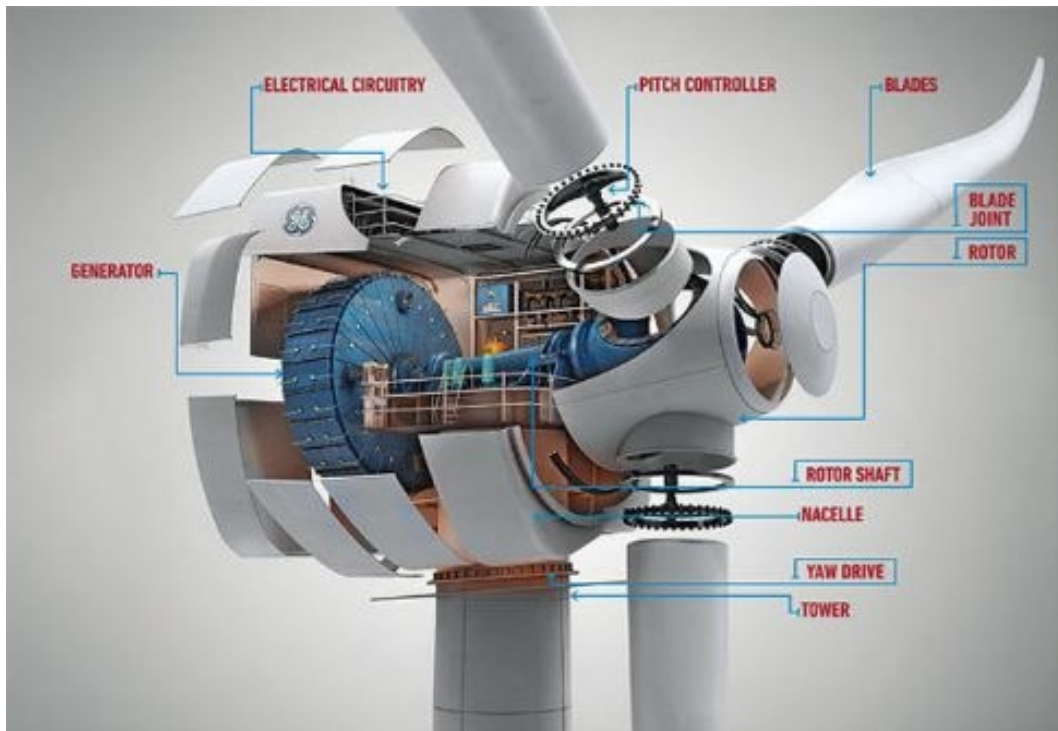
Τα συστήματα ενεργειακής μετατροπής του ανέμου (ανεμογεννήτριες) είναι μηχανές, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της περιστροφής του άξονα της πτερωτής, υλοποιείται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια, ενώ στο δεύτερο στάδιο, υλοποιείται η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, μέσω της γεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται συνήθως για συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών ενός συστήματος. Η παραγόμενη από τις ανεμογεννήτριες ισχύς, είτε καταναλώνεται επι τόπου, είτε εγχέεται και διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε περιπτώσεις που η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες, συχνά αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση της. Η αποθήκευση υλοποιείται με δύο οικονομικά βιώσιμους τρόπους, ανάλογα με το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) είναι η πλέον γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για μικρής κλίμακας παραγωγικές, μη διασυνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο, μονάδες. Η άντληση ύδατος με

χρήση ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ανεμογεννήτριες και η ταμίευσή του σε τεχνητές λίμνες κατασκευασμένες σε υψόμετρο το οποίο είναι ικανό να τροφοδοτήσει υδροηλεκτρικό σταθμό, είναι η μέθοδος αποθήκευσης που χρησιμοποιείται όταν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγάλη.

Υπάρχουν δύο τύποι ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου και οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, με αυτές του οριζόντιου άξονα να είναι ευρέως διαδεδομένες. Η ονομαστική ισχύς μίας ανεμογεννήτριας έχει εύρος από μερικές δεκάδες Watt μέχρι 5-7.5 MW. Κάθε ανεμογεννήτρια έχει μια χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας-ισχύος (power curve) που φανερώνει τη σχέση μεταξύ της παραγόμενης ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη αυτή εξαρτάται από διάφορες ιδιότητες της ανεμογεννήτριας όπως η επιφάνεια σάρωσης της φτερωτής, η αεροδυναμική και οι αποδόσεις των κιβωτίων ταχυτήτων και της μηχανής [3].

Μία ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα βασικά μέρη:

- **Πτερύγια.** Ο άνεμος που προσπίπτει πάνω στα πτερύγια δημιουργεί άνωση, που με τη σειρά της δημιουργεί μια ροπή γύρω από τον άξονα περιστροφής, με αποτέλεσμα την περιστροφή των πτερυγίων. Μερικές φορές χρησιμοποιείται σύστημα γραναζιών για να αυξηθεί η συχνότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Γεννήτρια.** Η γεννήτρια παράγει την ηλεκτρική ενέργεια όταν υφίσταται ικανοποιητικός άνεμος για να περιστρέψει τα πτερύγια. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο επόμενο στάδιο (είτε για αποθήκευση, είτε στο σύστημα διανομής, είτε για άμεση χρήση) χρησιμοποιώντας την εκάστοτε καλωδίωση.
- **Κατεύθυντήριο σύστημα.** Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα απαιτούν έναν μηχανισμό που να τις τοποθετεί προς την κατεύθυνση της αιολικής δύναμης. Οι μικρές ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως μια ουρά που τις περιστρέφει προς την σωστή κατεύθυνση. Οι μεγάλες μηχανές έχουν συνήθως έναν σερβομηχανισμό, που τις προσανατολίζει στην κατεύθυνση της μέγιστης αιολικής δύναμης.
- **Σύστημα προστασίας.** Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι συνήθως εξοπλισμένες με μηχανισμούς για να αποτρέψουν κάποια πιθανή ζημιά, κατά την περίπτωση υπερβολικά υψηλών ανέμων. Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες διαθέτουν κάποια επιπρόσθετα συστήματα, ώστε να διακόψουν την παραγωγή στις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Οι μικρότερες ανεμογεννήτριες αλλάζουν τον προσανατολισμό των πτερυγίων, ώστε να διαθέτουν μικρότερη επιφάνεια επαφής με τον άνεμο, με σκοπό τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων ή χρησιμοποιούν μηχανικά φρένα.
- **Πύργος.** Ο πύργος είναι μια μεταλλική συνήθως, σωληνωτή κατασκευή, η οποία ανυψώνει την ανεμογεννήτρια αρκετά πάνω από την τυρβώδη ροή του ανέμου κοντά στο έδαφος και συλλαμβάνει τον αέρα στα υψηλότερα στρώματα. Ο σχεδιασμός των πύργων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, καθώς πρέπει να είναι στιβαρός, να επιτρέπει την πρόσβαση στην ανεμογεννήτρια για τη συντήρησή της και να μην επιβαρύνει το κόστος του συστήματος [3].

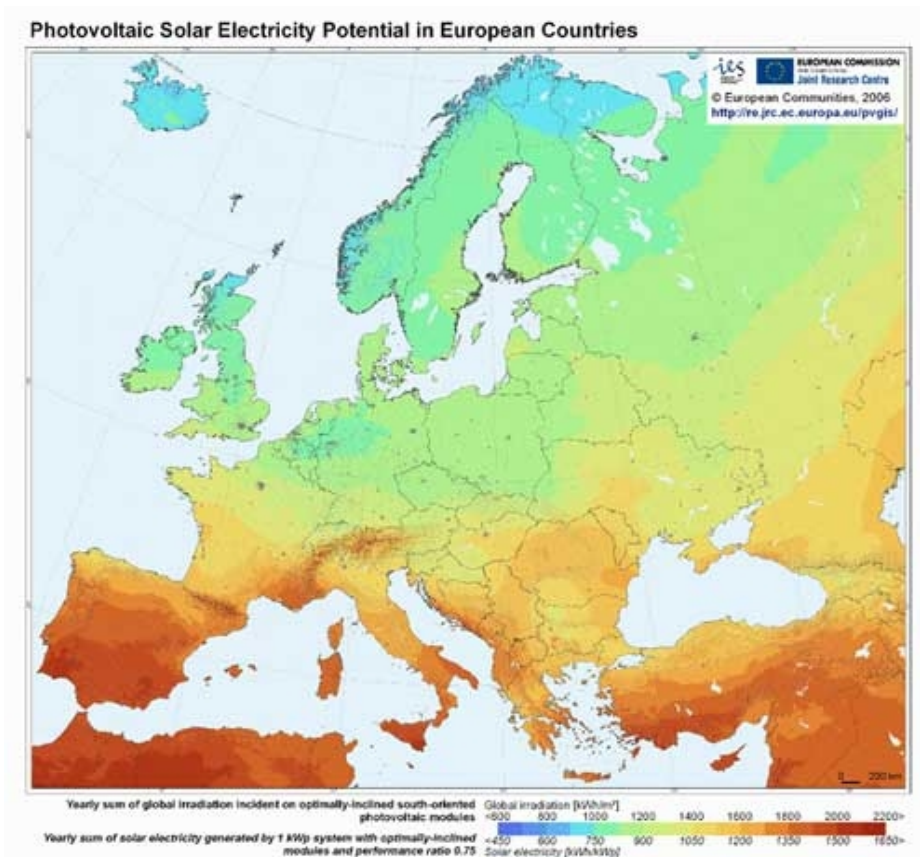


Σχήμα 1.5: Ανεμογεννήτρια και βασικά μέρη αυτής

1.4.2 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο απαραίτητη μορφή ενέργειας τόσο για τον άνθρωπο, όσο και για τα περισσότερα έμβια όντα στον πλανήτη Γη. Είναι η ενέργεια που ευθύνεται για την ύπαρξη πολλών άλλων μορφών ενέργειας. Η εξάτμιση του νερού, την οποία προκαλεί ο ήλιος, ώστε με την βροχή και την ανατροφοδότηση των πηγών να παράγεται την υδροδυναμική ενέργεια. Η αλλαγή στις μετεωρολογικές συνθήκες, που προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία και δημιουργεί το αιολικό δυναμικό. Και βέβαια, η επίδραση μέσω της φωτοσύνθεσης στον φυτικό κόσμο (έμμεσα και στον ζωικό), για την ζωή και τον πολλαπλασιασμό των φυτών, άρα και της βιομάζας σαν ενεργειακή μορφή [7].

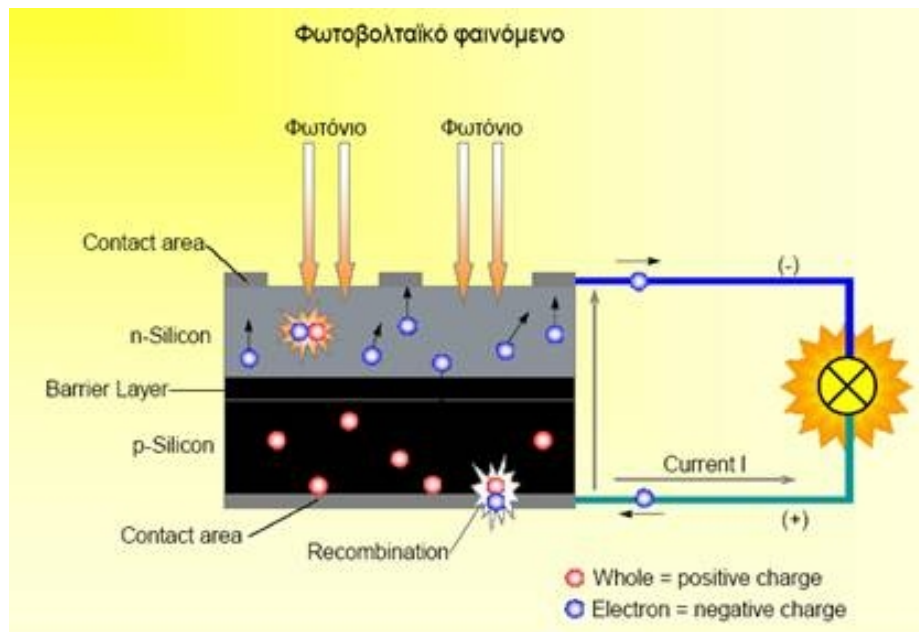
Στο Σχήμα που ακολουθεί, δίνεται μια σαφής εικόνα για την παγκόσμια ακτινοβολία και το φωτοβολταϊκό (PV) δυναμικό της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη. Παρόλο που θα περίμενε κανείς να υπάρχει υψηλότερη ετήσια ηλιακή απόδοση ενέργειας και συνεπώς περισσότερα φωτοβολταϊκά στα κράτη της νότιας Ευρώπη, φαίνεται ότι υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή αυτών σε ολόκληρη την ήπειρο.



Σχήμα 1.6: Παγκόσμια ακτινοβολία και PV δυναμικό της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη

Αναγάγοντας τη συνολική ισχύ στα κράτη – μέλη της Ένωσης, γίνεται εμφανές ότι οι επικεφαλές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά είναι η Γερμανία και η Ιταλία, με άθροισμα ισχύος πάνω από το μισό του συνόλου. Όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο, οι δύο πρώτες θέσεις καταλαμβάνονται από στις ίδιες χώρες, με τρίτη την Τσεχία και τέταρτο το Βέλγιο [7].

Η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται άμεσα σε ηλεκτρική με ηλιακές κυψέλες μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Κατά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το ηλιακό φως που προσπίπτει σε έναν ημιαγωγό δυο στρωμάτων δημιουργεί ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ αυτών. Η τάση αυτή μπορεί να τροφοδοτήσει μια, ανάλογης τάσης και ισχύος, συσκευή ή να διανεμηθεί στο ηλεκτρικό σύστημα [27].



Σχήμα 1.7: Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο



Σχήμα 1.8: Μονοκρυσταλλικές κυψέλες

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διαχωρίζονται σε διάφορες οικογένειες, βάσει του τύπου των κυψελών τους. Αναλυτικότερα, οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες (m-Si), οι οποίες διαθέτουν πάχος 1/3 έως 1/2 του χιλιοστού του μέτρου, κατασκευάζονται τεμαχίζοντας έναν ενιαίο κρύσταλλο πυριτίου, που έχει υποστεί επεξεργασία στους 1400°C. Η εν λόγω διαδικασία έχει αρκετά υψηλό κόστος. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει τέλεια δομή κρυστάλλου. Αυτού του είδους τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν και την μεγαλύτερη απόδοση, δηλαδή μετατρέπουν το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η απόδοση τους κυμαίνεται γύρω στο 18%-23%. Αν δηλαδή η ηλιακή

ακτινοβολία είναι 700 Wh/m^2 την ημέρα, τότε αυτά θα παράγουν για την συγκεκριμένη μέρα 120 Wh/m^2 έως 160 Wh/m^2 [27].

Αντίθετα, οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες (p-Si) κατασκευάζονται με μια διαδικασία χύτευσης, στην οποία το λιωμένο βιομηχανικό πυρίτιο εκχέεται σε μια φόρμα, όπου και μορφοποιείται. Κατόπιν, τεμαχίζεται σε λεπτά φύλλα. Δεδομένου ότι οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες κατασκευάζονται από χύτευση, η παραγωγή αυτών είναι σημαντικά φθηνότερη, όμως δεν έχουν τόσο υψηλή απόδοση (13-15%), όσο οι μονοκρυσταλλικές, γεγονός που οφείλεται στις ατέλειες της δομής του κρυστάλλου ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της χύτευσης [27].



Σχήμα 1.9: Πολυκρυσταλλικές κυψέλες

Η επόμενη κατηγορία φωτοβολταϊκών που παρουσιάζεται είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου. Το άμορφο πυρίτιο, μια από τις τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης (thin film technology), γίνεται με την εναπόθεση του πυριτίου επάνω σε ένα υπόστρωμα γυαλιού από ένα αντιδρόν αέριο όπως το σιλάνιο (SiH_4). Δεν έχει κρυσταλλική δομή, και το πάχος του (2-3 μm) είναι ιδιαίτερα μικρότερο από το κρυσταλλικής μορφής πυρίτιο (200-500 μm). Από κατασκευαστικής άποψης η τεχνολογία αυτή είναι η απλούστερη, επομένως και η φθηνότερη, αλλά η απόδοσή της είναι συγκριτικά μικρότερη. Παρόλα αυτά, είναι ικανοποιητική ακόμη και σε συνθήκες έλλειψης ηλιοφάνειας. Τα ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου έχουν μια κοκκινωπή-καφέ απόχρωση, σχεδόν μαύρη, και επιφάνεια αποτελούμενη από μεγάλους μήκους λωρίδες. Η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου κυμαίνεται μεταξύ 4% και 11%, ανάλογα με την τεχνολογία και τα υλικά που χρησιμοποιούνται [27].



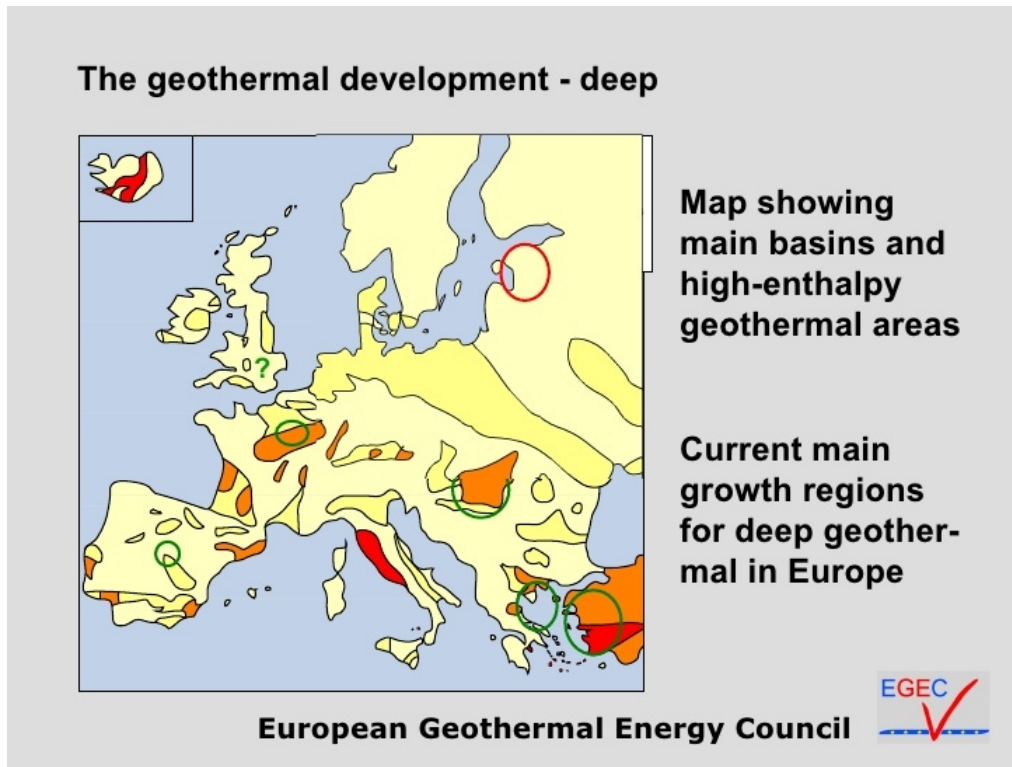
Σχήμα 1.10: Φωτοβολταϊκή κυψέλη άμορφου πυριτίου

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι υπό μορφή συνεχούς ρεύματος. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο είναι απαραίτητη για τη χρήση πολλών κοινών συσκευών, όπως και για την σύνδεση στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο και επιτυγχάνεται με έναν μετατροπέα συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα ή αλλιώς μετατροπέα DC-AC. Η αποδοτικότητα των μετατροπέων είναι γενικά μεγαλύτερη από 90%, όταν λειτουργούν πάνω από το 10% της εκτιμώμενης παραγωγής τους και μπορεί να φτάσει έως και 96%. Οι μετατροπείς που συνδέονται άμεσα με τα φωτοβολταϊκά ενσωματώνουν μια ηλεκτρονική διάταξη ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος, η οποία ρυθμίζει συνεχώς τη σύνθετη αντίσταση φορτίων, έτσι ώστε ο μετατροπέας να εξάγει πάντα τη μέγιστη ισχύ από το σύστημα. Οι μετατροπείς υπάγονται σε δύο κύριες κατηγορίες: στους αυτό-συγχρονιζόμενους και στους συγχρονιζόμενους, βάσει μίας σύνδεσης. Ο πρώτος τύπος μετατροπέων μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα, ενεργοποιούμενος από την πηγή ενέργειας. Δηλαδή, μόλις υπάρχει ρεύμα από τα φωτοβολταϊκά, τότε ενεργοποιείται για να μην σπαταλάει ρεύμα από τους συσσωρευτές. Ο συγχρονιζόμενος μετατροπέας ενεργοποιείται και ελέγχεται από το δίκτυο. Αυτό είναι απαραίτητο για να διατηρήσει το δίκτυο σταθερή ποιότητα ρεύματος και να αποφευχθούν πιθανά ατυχήματα. Αυτής της κατηγορίας οι μετατροπείς σταματάνε τη λειτουργία τους όταν υπάρχει βλάβη στο δίκτυο για την πρόληψη πιθανής ηλεκτροπληξίας. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας για ολόκληρη τη συστοιχία φωτοβολταϊκών. Ξεχωριστοί μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές συστοιχίες φωτοβολταϊκών, σε περίπτωση που η ισχύς είναι αρκετά μεγάλη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη παραγωγή, καθώς εάν προκύψει κάποιο πρόβλημα σε μια μονάδα, απομονώνεται χωρίς να σταματήσει η παραγωγή στο υπόλοιπο σύστημα [1].

1.4.3 Γεωθερμική ενέργεια

Γεωθερμική ενέργεια είναι η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη υπό την μορφή θερμού νερού ή ατμού στο υπέδαφος σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια της γης. Οι

γεωθερμικές πηγές παρέχουν σήμερα άμεσα αξιοποιήσιμη θερμική ισχύ πάνω από 12.000MW σε περισσότερες από 30 χώρες παγκοσμίως. Σε ό,τι αφορά την Ευρώπη, η γεωθερμική ενέργεια είναι διαθέσιμη παντού στην Ευρώπη, αν και υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη θερμοκρασία του υπόγειου προφίλ. Οι περιοχές στην κεντρική και νότια Ευρώπη είναι πιο κατάλληλες για γεωθερμική παραγωγή και ιδιαίτερα η Ιταλία και η Τουρκία καθώς διαθέτουν υπόγεια ύδατα με υψηλή θερμοκρασία.



Σχήμα1.11: Γεωθερμικοί πόροι στην Ευρώπη

Επιμερίζοντας τη συνολική παραγόμενη ισχύ γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης προς τα κράτη – μέλη, δύο χώρες κατέχουν παραπάνω από το 80% της συνολικής παραγωγής και συγκεκριμένα η Ιταλία και η Ισλανδία. Αντίθετα σε επίπεδο γεωθερμικής Θερμικών Αντλιών, η Σουηδία έχει την πρωτοκαθεδρία με διαφορά, ενώ ακολουθούν η Γερμανία και η Γαλλία. Τέλος, όσον αφορά την γεωθερμική τηλεθέρμανση η Ισλανδία είναι πρώτη με πολύ μεγάλη διαφορά [9].

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η πιο σημαντική μορφή αξιοποίησης των γεωθερμικών πόρων υψηλής θερμοκρασίας (>150°C). Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά λαμβάνει χώρα σε μονάδες που λειτουργούν είτε με συμβατικούς ατμοστρόβιλους ή με δυαδικό κύκλο, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού πόρου. Οι συμβατικοί ατμοστρόβιλοι απαιτούν ρευστά που έχουν θερμοκρασίες τουλάχιστον 150°C. Η μονάδα μπορεί να λειτουργεί με συμπυκνωτές, όπου η πίεση διατηρείται συνεχώς σε χαμηλά επίπεδα (condensing type) ή χωρίς (back pressure type), οπότε γίνεται διάθεση του ατμού στην ατμόσφαιρα. Ο τύπος με ατμοστρόβιλους ατμοσφαιρικής εκτόνωσης είναι απλούστερος και φθηνότερος. Ο ατμός που έρχεται, είτε απευθείας από γεωτρήσεις που

παράγουν ξηρό ατμό, είτε από γεωτρήσεις με υγρό ατμό αφού γίνει ο διαχωρισμός του νερού, περνά από τον ατμοστρόβιλο και στη συνέχεια απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα [4].

Οι μονάδες με συμπτυκνωτές, εξαιτίας του ότι συνοδεύονται από επιπλέον βοηθητικό εξοπλισμό, είναι πιο περίπλοκες στο σχεδιασμό τους και ιδιαίτερα εκείνες που είναι μεγαλύτερης ισχύος χρειάζονται εξαιρετικά αρκετό χρόνο κατασκευής και εγκατάστασης. Όμως, η κατανάλωση ατμού είναι περίπου μισή σε σχέση με την περίπτωση των ατμοστρόβιλων ατμοσφαιρικής εκτόνωσης. Οι πιο συνηθισμένες εγκαταστάσεις με συμπτυκνωτές έχουν ισχύ 55-60 MW, όμως πρόσφατα κατασκευάστηκαν και έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται μονάδες με ισχύ 110 MW. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ρευστά χαμηλής ή μέσης θερμοκρασίας και από το υψηλής θερμοκρασίας νερό που εξέρχεται από τους διαχωριστές στα γεωθερμικά πεδία υγρής φάσης, σημειώνει αξιόλογη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, κυρίως εξαιτίας της προόδου που επιτεύχθηκε στην τεχνολογία των δυαδικών ρευστών. Σε τέτοιου τύπου εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται ένα δευτερεύον, συνήθως οργανικό ρευστό (ισο-πεντάνιο), το οποίο έχει χαμηλό σημείο ζέσεως και υψηλή τάση ατμών σε χαμηλές θερμοκρασίες, αν συγκριθεί με τον υδάτινο ατμό. Το δευτερεύον ρευστό χρησιμοποιείται μέσα σε ένα συμβατικό οργανικό κύκλο Rankine (Organic Rankine Cycle) ως εξής: το γεωθερμικό ρευστό προσφέρει θερμότητα στο δευτερεύον υγρό μέσω εναλλακτών θερμότητας, οπότε το τελευταίο εξατμίζεται. Ο ατμός που παράγεται κινεί ένα στρόβιλο αξονικής ροής, στη συνέχεια ψύχεται και συμπτυκνώνεται, οπότε ο κύκλος αρχίζει ξανά [4].

1.4.4 Βιομάζα

Ο όρος βιομάζα περιλαμβάνει τα προϊόντα, τα υποπροϊόντα και τα κατάλοιπα της φυτικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής, καθώς και τα αστικά λύματα και απορρίμματα. Οι πρώτες ύλες βιομάζας που χρησιμοποιούνται ή αξιολογείται η χρήση τους, για την τροφοδοσία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, συνήθως εμπίπτουν σε μια από τις ακόλουθες γενικές κατηγορίες:

- Ξύλο (δασικό ξύλο, υπολείμματα ξύλου και λόχμες σύντομου κύκλου).
- Γεωργικά υπολείμματα, που περιλαμβάνουν τη βγάσση (ζαχαροκαλαμό σκονη), τα υπολείμματα ελιάς, κελύφη ρυζιού και άχυρα.
- Ενεργειακές καλλιέργειες (όπως είναι ο μισχανθός και η φάλαρις η καλαμοειδής).
- Απόβλητα, τα οποία περιλαμβάνουν τα αστικά στερεά απόβλητα, λύματα και κοπριά.

Οι τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι η άμεση καύση, η αεριοποίηση, η πυρόλυση και η αναερόβια χώνευση. Η άμεση καύση αντιστοιχεί στην οξειδωση της βιομάζας με περίσσεια αέρα, η οποία παρέχει θερμά καυσαέρια που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού στους τομείς εναλλαγής θερμότητας των λεβήτων. Κατόπιν, ο ατμός χρησιμοποιείται για την ηλεκτροπαραγωγή, εκτονούμενος μέσω ατμοστρόβιλου σε έναν κύκλο Rankine.

Στους κύκλους αεριοποίησης με βάση αέρα, η βιομάζα οξειδώνεται μερικώς με υποστοιχειομετρικές ποσότητες οξυγόνου, παρουσία ατμού, παρέχοντας ενέργεια για τη

θερμική μετατροπή της υπόλοιπης βιομάζας σε αέρια και οργανικούς ατμούς. Για την παραγωγή ηλεκτρισμού, τα καθαρισμένα αέρια της αεριοποίησης (αεριογόνο) τροφοδοτούνται απευθείας σε ένα λέβητα ή στο θάλαμο καύσης ενός αεριοστρόβιλου. Στους κύκλους έμμεσης αεριοποίησης χρησιμοποιείται εξωτερική πηγή θερμότητας, αντί για οξυγόνο, για να προσδώσει την ενέργεια για την αεριοποίηση. Έμμεση θέρμανση εφαρμόζεται επίσης στις διεργασίες πυρόλυσης για την μετατροπή της βιομάζας σε ένα μίγμα αερίων και οργανικών ατμών.

Ως πυρόλυση ορίζεται η θερμική καταστροφή των οργανικών υλικών. Συνεπώς, τεχνικά, η έμμεση αεριοποίηση είναι μια διεργασία πυρόλυσης. Εν προκειμένω, εάν το κύριο προϊόν της πυρόλυσης είναι αέριο η διαδικασία θεωρείται αεριοποίηση, ενώ εάν είναι συμυκνώσιμοι ατμοί η διαδικασία θεωρείται πυρόλυση.

Η αναερόβια χώνευση είναι μία βιολογική διεργασία με την οποία τα οργανικά απόβλητα μετατρέπονται σε βιοαέριο, ένα μίγμα μεθανίου (40-75% κατά όγκο) και διοξειδίου του άνθρακα. Η διεργασία βασίζεται στην αποδόμηση των οργανικών μακρομορίων της βιομάζας από φυσικά υφιστάμενους πληθυσμούς βακτηρίων [16].

1.4.5 Ωκεάνια ενέργεια

Μια όχι και τόσο ανεπτυγμένη μορφή ΑΠΕ είναι η μηχανική και θερμική ενέργεια των ωκεανών που χωρίζεται σε τέσσερις κυρίως κατηγορίες.

- Ενέργεια των κυμάτων
- Παλιρροιακή ενέργεια
- Θερμική ωκεάνια ενέργεια
- Ενέργεια Θαλάσσιων Ρευμάτων

Αναφορικά με την ενέργεια θαλάσσιων κυμάτων, ο άνεμος ο οποίος διέρχεται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας μεταφέρει μέρος της ενέργειάς του σε αυτήν δημιουργώντας τα κύματα. Η εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων είναι πιο εύκολη στις παράκτιες περιοχές. Ο πλέον διαδεδομένος τύπος μηχανής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα κύματα είναι αυτός με την ταλαντευόμενη στήλη νερού (Oscillating Water Column – OWC.). Η μηχανή αυτή στηρίζεται στην περιοδική μεταβολή της στάθμης του νερού μέσα σε ένα δοχείο, καθώς τα κύματα φτάνουν στην ακτή και εισέρχονται στο δοχείο. Καθώς η στάθμη του νερού ανεβαίνει, ωθεί τον αέρα που βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοχείου μέσα σε έναν αεροστρόβιλο στην κορυφή του δοχείου. Αντιστρόφως, καθώς πέφτει η στάθμη του νερού, ο αεροστρόβιλος αναρροφά αέρα από το περιβάλλον. Μηχανές αυτού του τύπου με ισχύ άνω των 500kW λειτουργούν ήδη σε διάφορα μέρη του κόσμου. Εκτός από αυτόν τον τύπο μηχανής, αναπτύσσονται και διάφορες άλλες μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια των κυμάτων, όπως για παράδειγμα η τοποθέτηση υποθαλάσσιων στροβιλογεννητριών σε περιοχές με ισχυρά υποθαλάσσια ρεύματα [14].

Η παλιρροιακή ενέργεια λειτουργεί με την ίδια βασική αρχή που λειτουργούν τα υδροηλεκτρικά. Ωστόσο, στην περίπτωση της παλιρροιακής ενέργειας η υψομετρική διαφορά

του νερού δημιουργείται από τη διακύμανση ανάμεσα στην πλημμυρίδα και την άμπωτη. Χτίζοντας ένα φράγμα κατά μήκος μιας εκβολής, μπλοκάρεται η ανερχόμενη ή κατερχόμενη παλίρροια. Όταν η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στις δύο στάθμες του νερού αυξηθεί, το νερό διοχετεύεται μέσω ενός υδροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Θα πρέπει να σημειωθεί πως για να έχουμε αξιοποιήσιμη παλιρροιακή ενέργεια θα πρέπει να υπάρχει σημαντική υψομετρική διαφορά μεταξύ πλημμυρίδας και άμπωτης φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται σε λίγα μέρη του κόσμου [24].

Με τρόπο παρόμοιο όπως κατά την εκμετάλλευση των παλιρροιών, γίνεται και εκμετάλλευση των θαλάσσιων ρευμάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρήση κατάλληλα κατασκευασμένων υδροστροβίλων. Τα θαλάσσια ρεύματα είναι εκμεταλλεύσιμα όταν η μέση ετήσια ταχύτητα του νερού ξεπερνάει κάποια κρίσιμη τιμή. Η αιτία των θαλάσσιων αυτών ρευμάτων μπορεί να είναι είτε οι διαφορές πίεσης και θερμοκρασίας μεταξύ γειτονικών περιοχών της θάλασσας, είτε και πάλι οι δυνάμεις παλίρροιας [14].

Τέλος, είναι γεγονός από πλήθος μετρήσεων ότι τα ανώτερα στρώματα της θάλασσας στις περιοχές με τροπικό κλίμα έχουν θερμοκρασία γύρω στους 27°C. Αντίθετα, η θερμοκρασία των θαλάσσιων υδάτων σε μεγάλο βάθος στις ανωτέρω περιοχές είναι πολύ χαμηλή, με αποτέλεσμα η διαφορά θερμοκρασίας, να φτάνει τους 20°C. Έχουν ήδη σχεδιαστεί δύο συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την αρχή αυτή: Ένα σύστημα κλειστού κυκλώματος με εργαζόμενο ρευστό με χαμηλό σημείο ζέσεως (π.χ. αμμωνία NH₃, βουτάνιο C₄H₁₀, προπάνιο C₃H₈ κ.λπ.), και ένα σύστημα ανοιχτού κυκλώματος με εργαζόμενο ρευστό το θαλασσινό νερό [26].

1.4.6 Υδροδυναμικό

Η κινητική ενέργεια των τρεχόμενων υδάτων είναι από τις σημαντικέσμορφές ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας, συνεπώς με την αύξηση σε ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε με κάποιες σχετικά μικρές μετατροπές.

Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΥΗΣ) μετατρέπεται η κινητική ή και δυναμική ενέργεια του τρεχόμενου νερού σε μηχανική ενέργεια, μέσω ενός υδροστροβίλου που λειτουργεί, σε αυτή την περίπτωση, σαν μετατροπέας ενέργειας. Η γεννήτρια, που είναι σε κοινό άξονα με τον υδροστρόβιλο, μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ανάλογα με την υψομετρική διαφορά του νερού που αξιοποιούν τα εργοστάσια, διακρίνονται σε σταθμούς χαμηλής (0-20m), μέσης (20-100m) και υψηλής πίεσης (>100m). Οι αξιοποιήσιμες υψομετρικές διαφορές που χρησιμοποιούνται είναι της τάξεως των λίγων μέτρων (π.χ. 3m) και κυμαίνονται μέχρι τα 1500m περίπου.

1.5 Αντιστροφείς (Inverters)

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση είναι γνωστοί με το όνομα αντιστροφείς (inverters). Ο σκοπός αυτών των διατάξεων είναι να μετατρέπουν την DC ισχύ εισόδου σε AC ισχύ εξόδου επιθυμητής τιμής τάσης, ρεύματος και συχνότητας. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή με σταθερή ή μεταβλητή συχνότητα, ανάλογα

με τις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε εφαρμογής. Οι αντιστροφείς μπορούν κυρίως να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες[22].

1. **Αντιστροφείς σταθερής πηγής τάσης:** Στην περίπτωση αυτή η DC τάση εισόδου είναι σταθερή ανεξάρτητη από το ρεύμα φορτίου. Η τάση στην έξοδο καθορίζεται από τον αντιστροφέα, ενώ η μορφή του ρεύματος εξαρτάται από το είδος του φορτίου. Διαχωρίζονται στις εξής υποκατηγορίες:
 - Μονοφασικοί αντιστροφείς τύπου ημι-γέφυρας
 - Μονοφασικοί αντιστροφείς τύπου γέφυρας, οι οποίοι διαχωρίζονται περαιτέρω σε αντιστροφείς τετραγωνικού κύματος (square wave output) και σε αντιστροφείς ημι-τετραγωνικού κύματος (quasi-square wave output)
 - Τριφασικοί αντιστροφείς τύπου γέφυρας
2. **Αντιστροφείς σταθερής πηγής ρεύματος:** Η αυτεπαγωγή σε σειρά με την τροφοδοσία είναι τόσο μεγάλη που διατηρεί το ρεύμα εισόδου σταθερό. Το ρεύμα στην έξοδο καθορίζεται από τον inverter, ενώ η τάση εξαρτάται από το είδος του φορτίου
3. **Αντιστροφείς DC ζεύξης (DC Link):** Είναι διατάξεις μετατροπής δύο βαθμίδων. Η εναλλασσόμενη τάση του δικτύου μετατρέπεται σε συνεχή μέσω ανορθωτή. Η ανορθωμένη τάση μετατρέπεται πάλι σε εναλλασσόμενη μέσω αντιστροφέα με δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας. Για την ανόρθωση χρησιμοποιείται ελεγχόμενος ανορθωτής ο οποίος τροφοδοτεί τον αντιστροφέα με μεταβλητή συνεχή τάση. Εάν ο ανορθωτής είναι μη ελεγχόμενος (μόνο δίοδοι) η ρύθμιση της τάσης γίνεται από τον ίδιο τον αντιστροφέα ή υπάρχει μια ενδιάμεση βαθμίδα μεταξύ ανορθωτή και αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας μπορεί να είναι είτε σταθερής πηγής τάσης ή σταθερής πηγής ρεύματος [22].

1.5.1 Λειτουργία αντιστροφέων

Ένας αντιστροφέας εξ'ορισμού μετατρέπει μια DC ισχύ σε μια AC ισχύ. Με άλλα λόγια κάνει την αντίστροφη λειτουργία ενός ανορθωτή. Υπάρχουν δύο τύποι αντιστροφέων. Ο αντιστροφέας φυσικής μεταγωγής και ο αντιστροφέας εξαναγκασμένης μεταγωγής [22].

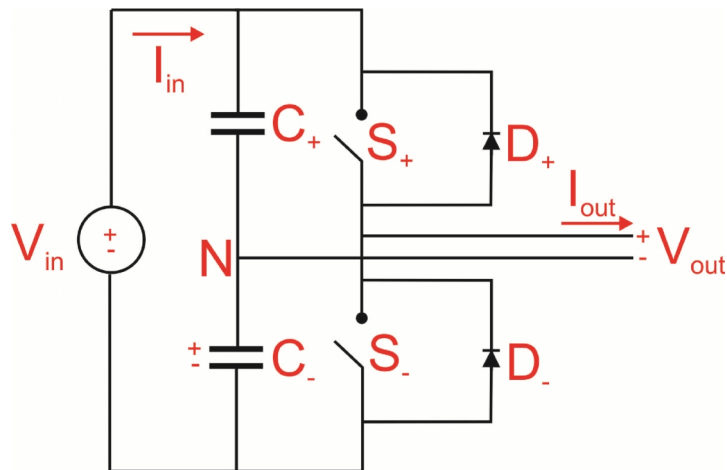
- **Αντιστροφέας φυσικής μεταγωγής:** Το κύκλωμα του αντιστροφέα φυσικής μεταγωγής είναι ακριβώς ίδιο με αυτό του ελεγχόμενου ανορθωτή με τη διαφορά ότι τα άκρα της μπαταρίας έχουν αντιστραφεί. Το ρεύμα μπορεί να ρέει μόνο από την άνοδο προς την κάθοδο και η πηγή δίδει ισχύ όταν το διακοπτικό στοιχείο άγει. Από την άλλη μεριά η ισχύς αυτή πρέπει να απορροφηθεί από τα άκρα της AC πλευράς επειδή δεν έχουμε απώλειες στο πηνίο και το διακοπτικό στοιχείο. Επομένως το κύκλωμα αυτό είναι δυναμικά ικανό να μετατρέψει DC ισχύ σε AC ισχύ. Για να επιτευχθεί αυτή η μετατροπή, η γωνία έναυσης των διακοπτικών στοιχείων πρέπει να είναι μικρότερη από κάποια οριακή τιμή.
- **Αντιστροφέας δυναμικής (εξαναγκασμένης) μεταγωγής:** Ο αντιστροφέας αυτός μετατρέπει DC ισχύ σε AC ισχύ. Υπάρχουν πολλοί τύποι αντιστροφέων εξαναγκασμένης μεταγωγής και όλοι στηρίζουν τη λειτουργία τους στην δυναμική μεταγωγή. Η συχνότητα εξόδου μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 20 kHz εξαρτώμενη από

την διακοπτική (switching) ικανότητα των διακοπτικών στοιχείων. Το φορτίο μπορεί να είναι παθητικό, όπως μια αντίσταση ή ένα πηνίο, ή ενεργό όπως ένας AC κινητήρας.

1.5.2 Μονοφασικοί αντιστροφείς

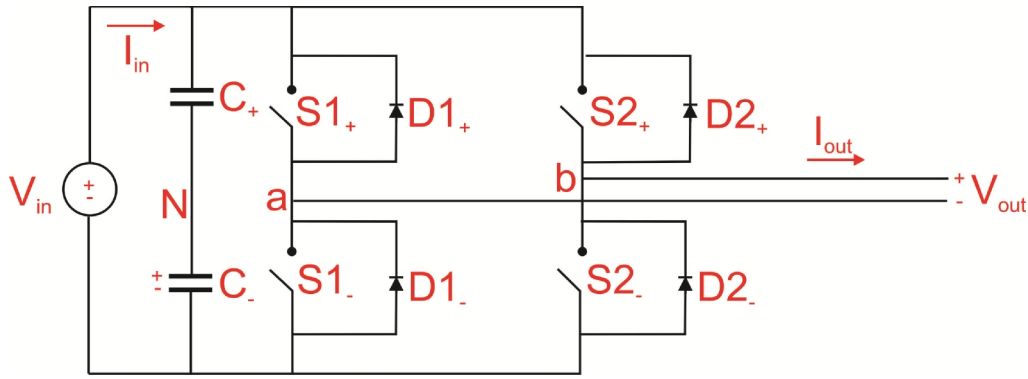
Οι μονοφασικοί αντιστροφείς χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: 1) Ημιγέφυρας και 2) Πλήρους γέφυρας [30].

Σε ένα μονοφασικό αντιστροφέα ημιγέφυρας (Σχήμα 1.12) υπάρχουν δύο πυκνωτές συνδεδεμένοι σε σειρά μεταξύ τους και παράλληλα με τη DC πηγή τάσης. Ο κάθε πυκνωτής παρουσιάζει στην είσοδό του τάση ίση με το μισό της τάσης εισόδου. Η κυματομορφή εξόδου του αντιστροφέα ημιγέφυρας είναι ένα τετραγωνικός παλμός του οποίου το πλάτος είναι $V_{in}/2$ ή $-V_{in}/2$. Άρα, υπάρχουν δύο καταστάσεις εξόδου. Ο έλεγχος της τάσης εξόδου υλοποιείται μέσω των διακοπών S_+ και S_- . Όταν η τάση εξόδου πρέπει να αυξηθεί, μειώνονται τα χρονικά διαστήματα αγωγής των διακοπών. Συνεπώς, μέσω της αύξησης ή της ελάττωσης των διαστημάτων αγωγής των διακοπών η τάξη εξόδου παραμένει σταθερή όταν υπάρχουν αρκετές διακυμάνσεις στην είσοδο του συστήματος.



Σχήμα 1.12: Μονοφασικός αντιστροφέας ημιγέφυρας

Ο μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας (Σχήμα 1.13) αποτελείται από δύο ημιγέφυρες. Έτσι αποφεύγεται η μεσαία λήψη στη συνεχή τροφοδοσία, αλλά χρειάζονται περισσότερα ημιαγωγικά στοιχεία. Οι ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες αναβοσβήνουν σε διαγώνια ζευγάρια. Δηλαδή, όταν S_{1+} και S_{2-} είναι σε αγωγή, S_{1-} και S_{2+} είναι σε αποκοπή και το αντίθετο. Συνεπώς, πάνω στο φορτίο εμφανίζεται μία τετραγωνική τάση $+V_{in}$ ως $-V_{in}$. Οι αντιπαράλληλες διόδους D_{1+} και D_{2-} έχουν ενεργό ρόλο μόνο όταν το φορτίο είναι επαγωγικής φύσης, διότι δημιουργούν ένα μονοπάτι επιστροφής του ρεύματος, άρα και της ενέργειας, από το φορτίο προς την είσοδο του αντιστροφέα [30].



Σχήμα 1.13: Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας

1.5.3 Τριφασικοί αντιστροφείς

Ο τριφασικός αντιστροφέας προκύπτει από τον μονοφασικό αντιστροφέα προσθέτοντας του έναν κλάδο ακόμα. Η λειτουργία είναι ανάλογη με αυτή του μονοφασικού αντιστροφέα [30].

Στην περίπτωση ελέγχου του τριφασικού αντιστροφέα με τετραγωνικούς παλμούς ισχύουν τα εξής:

- Κάθε ημιαγωγικό στοιχείο βρίσκεται είτε σε αγωγή είτε σε αποκοπή για 180° .
- Κάθε ακροδέκτης εξόδου (A, B, C) συνδέεται εναλλάξ για κάθε ημιπερίοδο στον θετικό ή στον αρνητικό πόλο στην πηγή τροφοδοσίας συνεχούς τάσης.
- Η τριφασική έξοδος επιτυγχάνεται προκαλώντας μια καθυστέρηση φάσεως 120° μεταξύ των παλμών έναυσης του κάθε κλάδου της γέφυρας.

1.5.4 Αντιστροφείς ελεγχόμενοι με την μέθοδο διαμόρφωσης Παλμών (PWM)

Ο έλεγχος της βασικής αρμονικής (πλάτος-συχνότητα) της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να επιτευχθεί με την μεταβολή του εύρους των παλμών, μεταβάλλοντας δηλαδή τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος του αντιστροφέα άγουν ή όχι. Η τεχνική αυτή με την οποία επιτυγχάνεται ο έλεγχος της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, μέσω της αυξομείωσης του εύρους των παλμών της τάσης εξόδου ονομάζεται διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation– PWM). Οι βασικές αρχές που διέπουν την τεχνική αυτή είναι οι εξής [30]:

- Μεταβολή του εύρους των παλμών με ημιτονοειδή τρόπο (sinusoidal pulse width modulation)
- Δημιουργία κυματομορφής αναφοράς (μια ημιτονοειδής αναφορά)
- Δημιουργία κυματομορφής φορέα (μια τριγωνική κυματομορφή)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Γεννήτριες

Η γεννήτρια (generator) είναι μία μηχανή που βασίζεται πάνω στους νόμους της ηλεκτροφυσικής και ιδιαίτερα του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Το συγκεκριμένο φαινόμενο ανακαλύφθηκε και περιγράφηκε από τον Άγγλο φυσικό Michael Faraday, το 1831 και αφορά τη μετατροπή της ενέργειας από μία μορφή σε μια άλλη. Συγκεκριμένα η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, σύμφωνα με το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, κατά τον οποίο εάν ένα πηνίο περιστραφεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε στις άκρες του πηνίου επάγεται ηλεκτρική τάση.

Η γεννήτρια αποτελείται από δύο μέρη. Το ακίνητο μέρος της ονομάζεται στάτης ή επαγωγέας και σε αυτό είναι τοποθετημένοι μαγνήτες (μόνιμοι μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες). Το κινητό μέρος της γεννήτριας ονομάζεται ρότορας (εκ του αγγλικού rotor) ή δρομέας και σε αυτό υπάρχουν πηνία. Η περιστροφική κίνηση του ρότορα μέσα στο στάτη παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η περιστροφή του ρότορα μπορεί να γίνει με ατμομηχανή, με υδροστρόβιλο και πληθώρα άλλων μεθόδων.

2.1 Είδη γεννητριών

Ανάλογα με το ρεύμα που παράγουν οι γεννήτριες ονομάζονται γεννήτριες συνεχούς ρεύματος ή γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.1.1 Γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος

Ως προς την κατασκευή τους, οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος δε διαφέρουν καθόλου από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Η μόνη διαφορά είναι, ότι από τις ψήκτρες της γεννήτριας παραλαμβάνεται συνεχές ρεύμα, ενώ στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος προσδίδεται στις ψήκτρες συνεχές ρεύμα και παραλαμβάνεται από τον άξονα τους μηχανική ενέργεια. Σε πολύ μικρές μηχανές συνεχούς ρεύματος το μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο περιστρέφεται το επαγωγικό τύμπανο, κατασκευάζεται από μόνιμο μαγνήτη. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τους μαγνητικούς πόλους, τα τυλίγματα των οποίων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα. Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου από το ηλεκτρικό ρεύμα λέγεται διέγερση της μηχανής [17].

Ανάλογα με τον τρόπο που είναι συνδεδεμένο το τύλιγμα διεγέρσεως, διακρίνονται τα εξής είδη γεννητριών:

1. **Γεννήτριες με εξωτερική διέγερση.** Στις γεννήτριες αυτές η περιέλιξη διεγέρσεως τροφοδοτείται από μία ξένη πηγή. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε χαμηλές τάσεις, για ηλεκτρολύσεις και ως γεννήτριες συνεχούς ρεύματος για την προώθηση των πλοίων.
2. **Γεννήτριες με αυτοδιέγερση.** Διακρίνονται στις τρεις παρακάτω κατηγορίες:
 - **Γεννήτριες με διέγερση σειράς.** Στις γεννήτριες αυτές η περιέλιξη διεγέρσεως συνδέεται σε σειρά με το φορτίο. Η τάση τους μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται το φορτίο του εξωτερικού κυκλώματος, για αυτό το λόγο δεν χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται σταθερή τάση. Η χρήση τους είναι περιορισμένη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένα μηχανήματα ηλεκτροσυγκολλήσεως όπου η τάση δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας.
 - **Γεννήτριες με παράλληλη διέγερση.** Στις γεννήτριες αυτές η περιέλιξη διεγέρσεως συνδέεται παράλληλα με το επαγωγικό τύλιγμα και κατά συνέπεια παράλληλα και προς το εξωτερικό φορτίο. Χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες πλοίων, για εγκαταστάσεις μικρής ισχύος και για την φόρτιση συσσωρευτών.
 - **Γεννήτριες με σύνθετη διέγερση.** Η περιέλιξη του κάθε κύριου πόλου αποτελείται από δύο μέρη, την παράλληλη περιέλιξη και την περιέλιξη σειράς. Η τάση ρυθμίζεται με μία ρυθμιστική αντίσταση που συνδέεται με την παράλληλη διέγερση. Με σταθερό αριθμό στροφών η παραγόμενη τάση είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται πολύ εάν υπάρξει απότομη μεταβολή του φορτίου [17].

Ο έλεγχος των γεννητριών συνεχούς ρεύματος γίνεται μέσω των εξής [17]:

- **Ρύθμιση χαρακτηριστικών καμπυλών τάσεως.** Μια μέθοδος που προτείνεται από τους κατασκευαστές είναι η ρύθμιση του διάκενου αέρος με την εισαγωγή ή εξαγωγή ελασμάτων μεταξύ των πόλων και του κελύφους. Άλλες μέθοδοι είναι η χρησιμοποίηση αντιστάσεως συνδεδεμένης παράλληλα με το πηνίο εν σειρά και η ρύθμιση της θέσεως των ψηκτρών.
- **Βοηθητικοί πόλοι.** Επειδή το παραγόμενο ρεύμα στο επαγωγίμο δημιουργεί ένα δικό του μαγνητικό πεδίο, προκαλείται από αυτό παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σπινθήρες μεταξύ των ψηκτρών και του συλλέκτη. Τοποθετούνται βοηθητικοί πόλοι για την εξάλειψη των σπινθηρισμών. Οι βοηθητικοί πόλοι παραλείπονται στις γεννήτριες πολύ μικρής ισχύος αλλά είναι απαραίτητοι στις γεννήτριες μεγάλης ισχύος για την επίτευξη καλής επαγωγής σε όλα τα φορτία. Κάθε βοηθητικός πόλος πρέπει να έχει την ίδια πολικότητα με αυτή του κύριου πόλου που βρίσκεται μετά από αυτόν κατά την διεύθυνση περιστροφής της μηχανής.
- **Ρυθμιστές διέγερσης.** Οι ρυθμιστές (ρεοστάτες) είναι απαραίτητοι σε όλους τους τύπους των γεννητριών, έτσι ώστε να ρυθμίζεται η τάση για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Χρησιμοποιούνται κυρίως για να αντισταθμίζουν τις μεταβολές της παράλληλης αντίστασης λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας του αέρα ψύξης. Ανεβάζοντας την θερμοκρασία αυξάνεται η αντίσταση του πηνίου τόσο πολύ που το ρεύμα διέγερσης δεν μπορεί να διατηρηθεί στην κανονική του τιμή και η τάση

στους ζυγούς πέφτει. Η πτώση αυτή υπολογίζεται από τον κατασκευαστή. Συνήθως, η τάση κατά μήκος των ρυθμιστών διέγερσης δεν είναι μικρότερη του 14% της τάσης της γεννήτριας.

2.1.2 Γεννήτριες Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι δύο ειδών. Οι σύγχρονες γεννήτριες ή εναλλακτήρες και οι ασύγχρονες γεννήτριες.

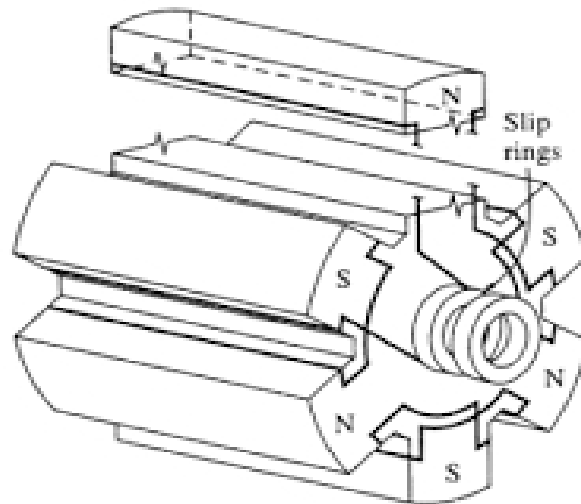
2.1.2.1 Σύγχρονες γεννήτριες

Η σύγχρονη γεννήτρια (synchronous generator), ή αλλιώς εναλλακτήρας, είναι σύγχρονη μηχανή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η σύγχρονη μηχανή χρησιμοποιούμενη ως γεννήτρια είναι η σπουδαιότερη μηχανή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί το επίκεντρο κάθε σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής τάσεως. Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει μια σύγχρονη γεννήτρια είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα της με συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας, καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική κινητήρια μηχανή, το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Τελικά, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής. Ο δρομέας μιας σύγχρονης μηχανής μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μεγάλος ηλεκτρομαγνήτης τόσο στην περίπτωση που η γεννήτρια είναι έκτυπων πόλων, όσο και όταν αυτή διαθέτει κυλινδρικό δρομέα. Οι πόλοι μιας γεννήτριας έκτυπων πόλων διακρίνονται στην επιφάνεια του δρομέα ενώ όταν ο δρομέας είναι κυλινδρικός, οι πόλοι του βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με την υπόλοιπη επιφάνειά του [5]. Στο Σχήμα 2.1, φαίνεται ένας δρομέας με κυλινδρική επιφάνεια και στο Σχήμα 2.2, ο δρομέας μιας γεννήτριας έκτυπων πόλων.



Σχήμα 2.1: Δρομέας με κυλινδρική επιφάνεια

Δρομείς με κυλινδρική επιφάνεια έχουν συνήθως οι γεννήτριες δύο ή τεσσάρων πόλων, ενώ οι γεννήτριες έκτυπων πόλων συνήθως διαθέτουν πάνω από τέσσερις πόλους.



Σχήμα 2.2: Δρομέας έκτυπων πόλων σύγχρονης γεννήτριας έξι πόλων

Συνήθως, ο πυρήνας του δρομέα είναι συμπαγής, επειδή το μαγνητικό πεδίο αυτού είναι συνεχές και συνεπώς δεν δημιουργούνται απώλειες δινορευμάτων. Μόνο τα πέλματα των πόλων στη μηχανή με έκτυπους πόλους κατασκευάζονται από ελάσματα για την αποφυγή των δινορευμάτων, διότι εκεί το μαγνητικό πεδίο παρουσιάζει κάποια μεταβολή. Επίσης, το τυλίγμα του δρομέα στις σύγχρονες γεννήτριες θα πρέπει να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Επειδή, όμως, ο δρομέας περιστρέφεται, είναι ανάγκη να αναπτυχθεί κάποιος ειδικός τρόπος τροφοδοσίας του τυλίγματός του. Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές τροφοδοσίας του δρομέα είναι [5]:

1. Με τροφοδοσία από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, οπότε ο δρομέας θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με ψήκτρες (brushes) και δαχτυλίδια (slip rings).
2. Με τροφοδοσία από διεγέρτρια μηχανή, είτε DC, είτε AC με ανορθωτική γέφυρα, η οποία βρίσκεται τοποθετημένη πάνω στον άξονα της γεννήτριας.

Τα μεταλλικά δαχτυλίδια της γεννήτριας καλύπτουν όλη την περίμετρο του άξονά της και μονώνονται ηλεκτρικά από αυτόν. Το ένα άκρο του τυλίγματος του δρομέα συνδέεται στο πρώτο από τα δύο δαχτυλίδια και το άλλο άκρο στο δεύτερο. Οι ψήκτρες τοποθετούνται, ώστε να εφάπτεται μία στο κάθε δαχτυλίδι. Έτσι, με τη σύνδεση του θετικού άκρου της πηγής στη μία ψήκτρα και του αρνητικού στην άλλη, επιτυγχάνεται η συνεχής τροφοδοσία του δρομέα. Όμως, η χρήση δαχτυλιδιών και ψηκτρών για την τροφοδοσία του δρομέα της γεννήτριας παρουσιάζει δύο μειονεκτήματα. Το πρώτο είναι ότι απαιτείται συχνή αντικατάσταση των ψηκτρών, που φθείρονται λόγω τριβής, και το δεύτερο ότι η πτώση τάσης στις ψήκτρες μπορεί να προκαλέσει αρκετά σημαντικές απώλειες ισχύος, ιδίως όταν τα ρεύματα που τις διαρρέουν έχουν μεγάλη ένταση. Παρόλα αυτά, ο συνδυασμός δαχτυλιδιών και ψηκτρών χρησιμοποιείται σε σύγχρονες γεννήτριες μικρής ισχύος, όπου η χρήση άλλων μεθόδων είναι εξαιρετικά δαπανηρή [5].

Σε μεγαλύτερες γεννήτριες χρησιμοποιούνται διεγέρτριες μηχανές χωρίς ψήκτρες (brushless exciters) για να τροφοδοτήσουν με συνεχές ρεύμα το δρομέα της γεννήτριας. Αυτές οι διεγέρτριες μηχανές είναι μικρές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος των οποίων το κύκλωμα οπλισμού τους τοποθετείται στον άξονα του δρομέα. Η τριφασική έξοδος της διεγέρτριας ανορθώνεται από ένα τριφασικό ανορθωτή, που βρίσκεται πάνω στον άξονα της μηχανής και το συνεχές ρεύμα εξόδου του ανορθωτή οδηγείται στο τυλίγμα διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να ρυθμιστεί το ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας μεταβάλλοντας απλώς το συνεχές ρεύμα διέγερσης της διεγέρτριας, που βρίσκεται πάνω στο στάτη και έχει πολύ μικρότερη τιμή. Είναι προφανές ότι εδώ, αφού δεν εμπλέκονται μηχανικά τμήματα στη διαδικασία τροφοδοσίας της διέγερσης της γεννήτριας, τα μειονεκτήματα της προηγούμενης μεθόδου έχουν ξεπεραστεί [5].

Για να γίνει, όμως, η διαδικασία τροφοδοσίας του δρομέα εντελώς ανεξάρτητη από εξωτερικές πηγές, μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα μια προ-διεγέρτρια μηχανή (pilot exciter). Αυτή είναι μια μικρή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με δρομέα που διαθέτει μόνιμους μαγνήτες και τοποθετείται στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας. Η προ-διεγέρτρια παράγει τριφασική τάση που ανορθώνεται και τροφοδοτεί τη διέγερση της διεγέρτριας, η οποία με τη σειρά της τροφοδοτεί το δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας. Έτσι, η γεννήτρια δεν έχει πια ανάγκη από καμία εξωτερική πηγή τροφοδοσίας. Επίσης, συχνά οι γεννήτριες με διεγέρτριες διαθέτουν δαχτυλίδια και ψήκτρες, ώστε να έχουν εναλλακτικούς τρόπους τροφοδοσίας της διέγερσής τους σε έκτακτες περιπτώσεις. Ο στάτης είναι μία κοίλη κυλινδρική κατασκευή από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων που φέρει διαμήκεις αυλακώσεις στην εσωτερική του επιφάνεια. Στις αυλακώσεις αυτές τοποθετούνται τα τυλίγματα του στάτη, που διευθετούνται σε τρεις συμμετρικές ζώνες (μία για κάθε φάση) που σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 120°. Τα τυλίγματα του στάτη δημιουργούνται από προκατασκευασμένες συστάδες αγωγών και είναι δύο στρώσεων. Συνήθως, τα τυλίγματα του στάτη είναι διανεμημένα τυλίγματα χορδής, για την καταστολή των αρμονικών στην έξοδο της γεννήτριας [5].

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, ονομάζονται σύγχρονες επειδή οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Ο δρομέας των μηχανών αυτών είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης, του οποίου το πεδίο περιστρέφεται με φορά ίδια με αυτή του δρομέα. Η σχέση της ηλεκτρικής συχνότητας του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου δίνεται από την εξίσωση [15]:

$$f_c = \frac{n_m \cdot P}{120} \quad (2.1)$$

Όπου, f_c η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz, n_m η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε rpm, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στις σύγχρονες μηχανές και P το πλήθος των πόλων.

Επειδή, ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται και το μαγνητικό πεδίο της, η παραπάνω εξίσωση δίνει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής και της ηλεκτρικής συχνότητάς της. Οι γεννήτριες, όμως, συνήθως παράγουν συχνότητες 50 ή 60 Hz, οπότε η ταχύτητα περιστροφής τους για συγκεκριμένο αριθμό πόλων είναι προκαθορισμένη. Για παράδειγμα, για την παραγωγή συχνότητας 50 Hz, μία μηχανή τεσσάρων πόλων θα πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα 1500 rpm. Δηλαδή, η

εξίσωση (2.1) δίνει την ταχύτητα με την οποία θα πρέπει να περιστρέφεται η μηχανή, ώστε να παράγει τη συγκεκριμένη συχνότητα [15].

Σε περίπτωση που για διάφορους λόγους δεν ισχύει η εξίσωση (2.1), η μηχανή αποσυγχρονίζεται. Η κατάσταση αυτή δεν μπορεί να είναι μόνιμη διότι επέρχονται βλάβες και η μηχανή παύει να λειτουργεί. Επειδή ένας κύκλος τάσης, που αντιστοιχεί σε 360° , παράγεται κάθε φορά που ένα ζεύγος πόλων περνά από ένα τύλιγμα στάτη, θα πρέπει να κάνουμε διάκριση μεταξύ ηλεκτρικής γωνίας, που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τάσεις και ρεύματα και μηχανικής γωνίας, που χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη θέση του δρομέα. Για μηχανή με δύο πόλους οι γωνίες αυτές είναι ίσες, αλλά για P μεγαλύτερο του δύο έχουμε [15]:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \cdot \theta_m \quad (2.2)$$

Όπου θ_e η γωνία εκπεφρασμένη σε ηλεκτρικές μοίρες (ή ακτίνια) και θ_m η ίδια γωνία εκπεφρασμένη σε μηχανικές μοίρες (ή ακτίνια).

Η τάση στα άκρα της κάθε φάσης μιας σύγχρονης μηχανής περιγράφεται αναλυτικά από τη σχέση:

$$E_A = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N_c \cdot \Phi \cdot f \quad (2.3)$$

Δηλαδή, η ηλεκτρεγερτική δύναμη (E_A) εξαρτάται από τη μαγνητική ροή Φ από τη συχνότητα f ή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής και από κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της (N_c ο αριθμός των τυλιγμάτων του στάτη). Συχνά, όμως, στα προβλήματα που έχουν να κάνουν με σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιείται μία πιο απλή μορφή της εξίσωσης 2.3, που δίνει έμφαση μόνο στους παράγοντες που μεταβάλλονται κατά τη λειτουργία της μηχανής. Αυτή η απλή μορφή της εξίσωσης είναι:

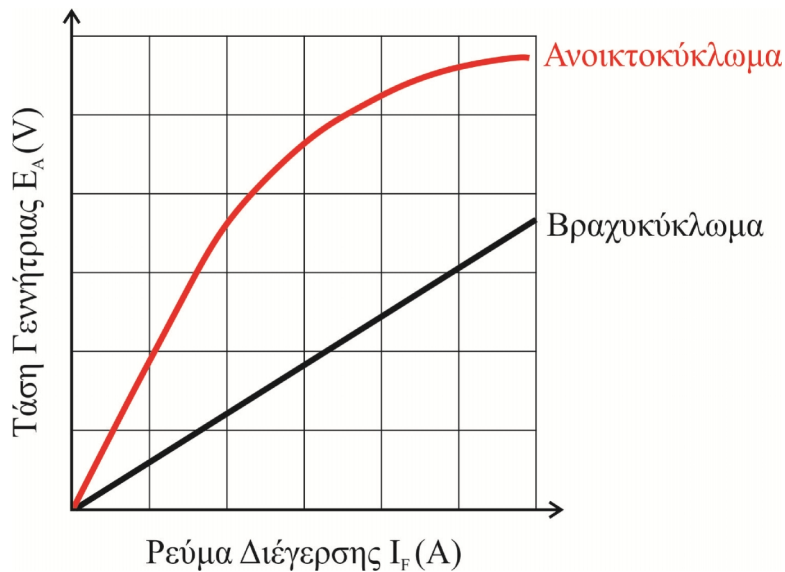
$$E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (2.4)$$

Όπου, K η σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής και υπολογίζεται μέσω των σχέσεων 2.5 και 2.6, στην περίπτωση που η γωνιακή ταχύτητα δίνεται σε ηλεκτρικά rad/s ή στην περίπτωση που η γωνιακή ταχύτητα δίδεται σε μηχανικά rad/s, αντίστοιχα. Με P συμβολίζεται ο αριθμός των πόλων του στάτη.

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

$$K = \frac{N_c \cdot P}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

Η τάση E_A που παράγεται στα άκρα μιας φάσης στο εσωτερικό της γεννήτριας είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής στη μηχανή και της ταχύτητας περιστροφής της. Όμως, η μαγνητική ροή εξαρτάται από το ρεύμα του δρομέα (ρεύμα διέγερσης) I_F , σύμφωνα με την καμπύλη του Σχήματος 2.3 [23].



Σχήμα 2.3: Η εσωτερική τάση σε συνάρτηση με το ρεύμα διέγερσης, στην περίπτωση ανοικτοκυκλώματος (κόκκινο) και βραχυκυκλώματος (μαύρο)

Έστω E_A η τάση στα άκρα της μιας φάσης που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας. Αυτή η τάση σπάνια εμφανίζεται στα άκρα της μηχανής. Αντίθετα, είναι ίση με την αντίστοιχη τάση στα άκρα της μηχανής V_ϕ μόνο όταν το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη είναι μηδέν. Η ανάλυση των αιτιών που διαφοροποιούν την E_A από τη V_ϕ οδηγεί στην ανάπτυξη του μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας [2]. Οι λόγοι που διαφοροποιούν την E_A από τη V_ϕ είναι οι εξής:

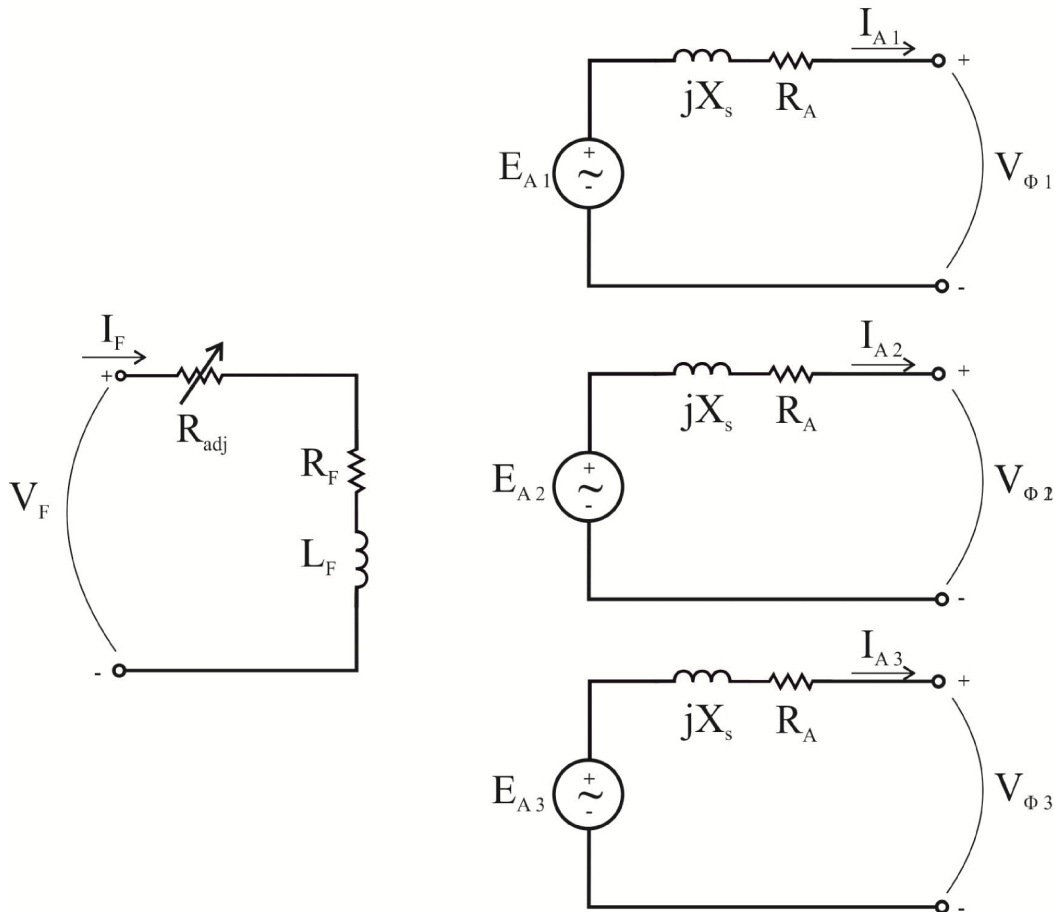
- Η παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής που προκαλείται από το ρεύμα του στάτη. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση επαγωγικού τυμπάνου (armature reaction)
- Οι αυτεπαγωγές των αγωγών του στάτη
- Οι αντιστάσεις των αγωγών του στάτη
- Το σχήμα των έκτυπων πόλων του δρομέα.

Το πρώτο και πιο σημαντικό από τα παραπάνω φαινόμενα είναι η αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου. Η περιστροφή του δρομέα στο εσωτερικό της γεννήτριας παράγει τάση E_A σε κάθε φάση του στάτη. Όταν όμως στα άκρα της μηχανής συνδεθεί κάποιο φορτίο, εμφανίζεται ρεύμα στους αγωγούς του στάτη το οποίο παράγει ένα νέο πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Το πεδίο του στάτη με τη σειρά του επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο που ήταν από πριν διαμορφωμένο στη μηχανή, αλλά και την τάση στα άκρα της κάθε φάσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου, επειδή το τύλιγμα του τυμπάνου είναι αυτό που παραμορφώνει την τάση στα άκρα της γεννήτριας [2]. Έτσι, η τάση V_ϕ δίνεται από τη σχέση:

$$V_\phi = E_A - jX_s I_A - R_A I_A \quad (2.7)$$

Όπου, X_S η σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας, R_A η ωμική αντίσταση μιας φάσης και I_A το ρεύμα μιας φάσης.

Έτσι, μπορεί να παρασταθεί το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας. Αυτό γίνεται στο Σχήμα 2.4, όπου φαίνεται το κύκλωμα διέγερσης της μηχανής με την πηγή που τροφοδοτεί το δρομέα.



Σχήμα 2.4: Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα μιας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας

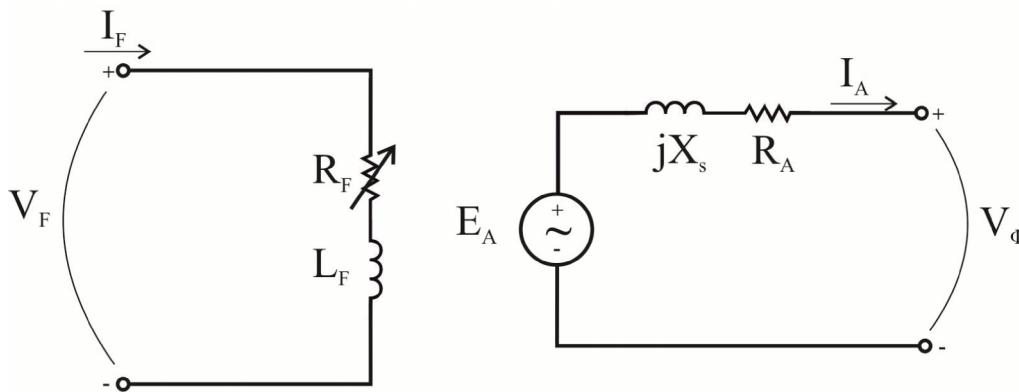
Το τύλιγμα της διέγερσης αντιπροσωπεύεται από μία αυτεπαγωγή και από μία αντίσταση. Σε σειρά με την R_F έχει συνδεθεί η ρυθμιστική αντίσταση R_{adj} , η οποία δύναται να μεταβάλλει το ρεύμα διέγερσης. Το υπόλοιπο κύκλωμα αποτελείται από τα ισοδύναμα κυκλώματα των τριών φάσεων. Στο καθένα από αυτά, φαίνεται η αντίστοιχη τάση που παράγεται στο εσωτερικό της μηχανής σε σειρά με τη σύγχρονη αντίδραση X_S και την αντίσταση του τυλίγματος της φάσης R_A . Οι τάσεις και τα ρεύματα των τριών φάσεων διαφέρουν μεταξύ τους μόνο στη φάση (παρουσιάζουν διαφορά φάσης 120° η μία από την άλλη), ενώ κατά τα άλλα είναι όμοιες [2]. Όταν οι τρεις φάσεις του στάτη βρίσκονται σε συνδεσμολογία αστέρα, το μέτρο των αντίστοιχων πολικών τάσεις V_T είναι:

$$V_T = \sqrt{3} \cdot V_\phi \quad (2.8)$$

Έτσι, αν για παράδειγμα η φασική τάση είναι 230 V, η πολική θα είναι 400 V. Ενώ, όταν συνδέονται σε τρίγωνο ισχύει:

$$V_T = V_\phi \quad (2.9)$$

Το γεγονός ότι η μόνη διαφοροποίηση ανάμεσα στις τρεις φάσεις είναι η διαφορά φάσης που εμφανίζεται μεταξύ τους, οδηγεί στην εισαγωγή του ισοδύναμου κυκλώματος ανά φάση. Στο Σχήμα 2.5, φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση της παραπάνω μηχανής. Εδώ πρέπει να τονιστεί πως οι τάσεις και τα ρεύματα όλων των φάσεων είναι ίσα μόνο στην περίπτωση που το φορτίο της γεννήτριας είναι συμμετρικό [2].



Σχήμα 2.5: Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας

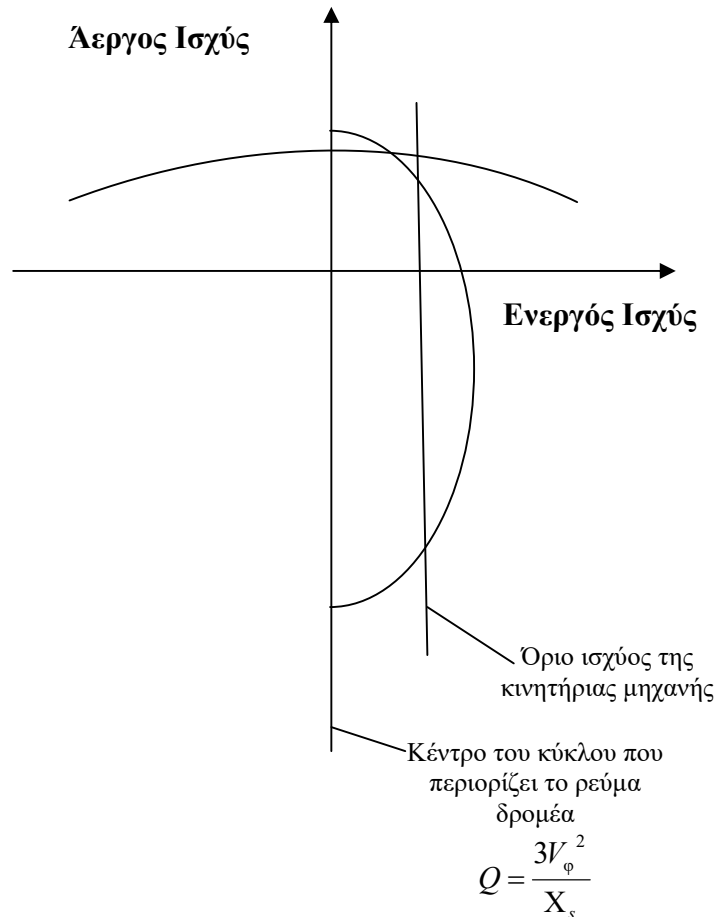
Τα όρια ασφαλούς λειτουργίας που θέτουν τα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα μιας σύγχρονης γεννήτριας, καθώς και τα όρια που θέτουν κάποιοι εξωτερικοί παράγοντες, συνδυάζονται μεταξύ τους στο διάγραμμα λειτουργίας (capability diagram) της γεννήτριας. Πρόκειται για την καμπύλη της φαινόμενης ισχύος της μηχανής, όπως αυτή υπολογίζεται από το διανυσματικό διάγραμμά της, όπου θεωρείται ότι η τάση V_ϕ είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική τάση. Με τον τρόπο αυτό, λαμβάνεται η καμπύλη της ενεργού ως προς την άεργο ισχύ. Οι γεωμετρικοί τόποι σταθερού ρεύματος του στάτη παρουσιάζονται στο διάγραμμα μέσω των γεωμετρικών τόπων σταθερής φαινόμενης ισχύος που είναι ομόκεντροι κύκλοι γύρω από την αρχή των συντεταγμένων [28].

Ανάλογα, οι γεωμετρικοί τόποι σταθερού ρεύματος διέγερσης ή σταθερής E_A είναι ομόκεντροι κύκλοι με ακτίνα $\frac{3E_A V_\phi}{X_s}$ που έχουν το κέντρο τους στο σημείο [28]:

$$Q = -\frac{3V_\phi^2}{X_s} \quad (2.10)$$

Στο Σχήμα που ακολουθεί, το όριο ασφαλείας του ρεύματος του στάτη που αντιστοιχεί στο ονομαστικό ρεύμα I_A , περιγράφεται με τον κύκλο της ονομαστικής φαινόμενης ισχύος και το όριο του ρεύματος διέγερσης, παρουσιάζεται με τον κύκλο που αντιστοιχεί στο ονομαστικό I_F

ή την ονομαστική E_A . Τα σημεία λειτουργίας που εμπεριέχονται στο εσωτερικό αυτών των δύο κύκλων, αποτελούν τα ασφαλή σημεία λειτουργίας. Στο ίδιο Σχήμα, παρουσιάζεται και το όριο της μέγιστης ισχύος που προσφέρει η κινητήρια μηχανή [28].



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας

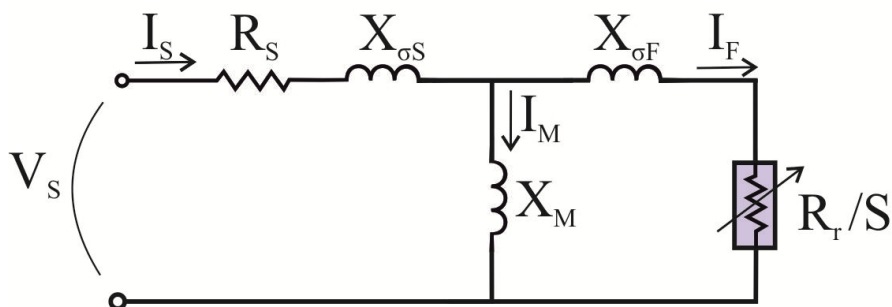
2.1.2.2 Ασύγχρονες γεννήτριες

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση των ασύγχρονων γεννητριών καθιερώθηκε ευρύτατα, κυρίως με την ανάπτυξη της χρήσης ανεμογεννητριών ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ασύγχρονων γεννητριών είναι ότι δεν μπορούν να παράγουν άεργο ισχύ. Αντίθετα καταναλώνουν άεργο ισχύ. Για το λόγο αυτό, απαιτείται μια εξωτερική πηγή άεργου ισχύος μόνιμα συνδεδεμένη. Αυτή η εξωτερική πηγή είναι εκείνη που θα ρυθμίσει και την τάση στην έξοδο της γεννήτριας, καθώς, λόγω έλλειψης ρεύματος διέγερσης, αυτό είναι αδύνατο να το καταφέρει από μόνη της η γεννήτρια. Συνεπώς, κάποιιοι εξωτερικοί πυκνωτές είναι αυτοί που θα παράγουν το ρεύμα μαγνήτισης που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη γεννήτρια. Επίσης, ένα ιδιαίτερο πρόβλημα που παρατηρείται είναι το ότι η τάση στα άκρα της έχει άμεση και μεγάλη εξάρτηση από το φορτίο και όταν αυτό έχει ισχυρό

επαγωγικό χαρακτήρα μπορεί να έχουμε μεγάλη πτώση στην τάση της γεννήτριας. Αυτός είναι και ο λόγος της δυσκολίας εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα από ασύγχρονη γεννήτρια. Γενικά η ασύγχρονη γεννήτρια επιδεινώνει τον συντελεστή ισχύος του δικτύου και προκαλεί μεγάλες πτώσεις τάσης[12].

Παρά τα μειονεκτήματά της, η ασύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Αυτό δεν είναι άλλο από την απλότητα της κατασκευής της, η οποία έγκειται στο γεγονός ότι δεν απαιτείται ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης και ότι δεν υπάρχει ανάγκη συνεχούς κίνησης με την ίδια ταχύτητα. Έτσι όσο μεγαλύτερη ροπή εφαρμόζεται στον άξονά της, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς στην έξοδο. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μιας ασύγχρονης γεννήτριας [12].

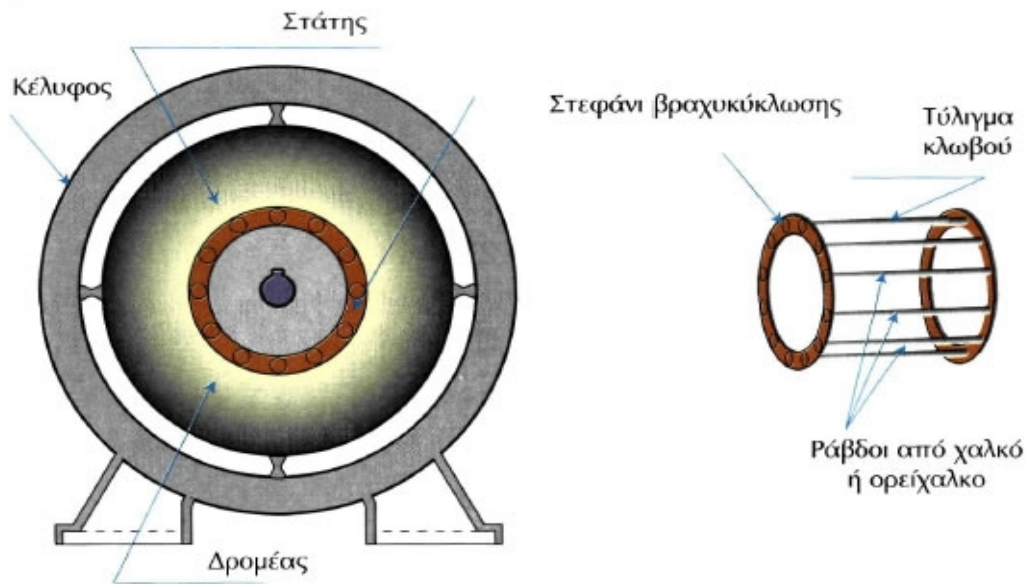


Σχήμα 2.7: Ηλεκτρικό ισοδύναμο ασύγχρονης μηχανής

Όπου, V_s η τάση στα άκρα της γεννήτριας (στάτη), I_s το ρεύμα του στάτη, R_s και $X_{\sigma S}$ η αντίσταση και αντίδραση αντίστοιχα των τυλιγμάτων του στάτη, I_M το ρεύμα μαγνήτισης, X_M η αντίδραση μαγνήτισης, $X_{\sigma R}$ η αντίδραση των τυλιγμάτων του δρομέα, I_R το ρεύμα δρομέα, R_r η αντίσταση των τυλιγμάτων του δρομέα και S η ολίσθηση.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται σε δύο είδη, με τις ίδιες όμως αρχές λειτουργίας και συγκεκριμένα στις γεννήτριες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή κλωβού (squirrel cage induction generator) και στις γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor induction generator). Υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία ασύγχρονης γεννήτριας, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (double fed induction generator). Αυτή κατασκευαστικά δεν διαφέρει πολύ από την γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα [15].

Στη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα, το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από μπάρες χαλκού λίγο μεγαλύτερες σε μήκος από το δρομέα που τοποθετούνται μέσα στις αυλακώσεις του δρομέα, ενώ οι άκρες των μπαρών βραχυκυκλώνονται με τη βοήθεια δυο χάλκινων δακτυλίων. Η κατασκευή του εν λόγω δρομέα θυμίζει κλειστό κλουβί και λόγω αυτού καθιερώθηκε η ονομασία «τύλιγμα κλωβού». Σε μικρού και μεσαίου μεγέθους μηχανές οι μπάρες και το στεφάνι βραχυκύκλωσης είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο, με τέτοιο τρόπο, ώστε να διαμορφώνει ένα εσωτερικό καλούπι [6].



Σχήμα 2.8: Τύλιγμα κλωβού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Στη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα, ο δρομέας αποτελείται από ένα τριφασικό τύλιγμα ανάλογο με αυτό του στάτη. Το τύλιγμα αυτό κατανέμεται με ίσο τρόπο στις αυλακώσεις του στάτη και τα άκρα του συνδέονται σε τρεις δακτυλίους, τους λεγόμενους δακτυλίους ολίσθησης (slip-rings). Οι δακτύλιοι ακολουθούν την κίνηση του δρομέα, κινούνται δηλαδή με την ίδια ταχύτητα. Οι περιστρεφόμενοι δακτύλιοι και οι ψήκτρες, οι οποίες τροφοδοτούν τους δακτυλίους επιτρέπουν τη σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων σε σειρά με το δρομέα. Οι αντιστάσεις αυτές χρησιμοποιούνται για την ομαλή εκκίνηση της γεννήτριας [13].



Σχήμα 2.9: Δρομέας μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα



Σχήμα 2.10: Μηχανές δακτυλιοφόρου δρομέα

Στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται μια αναφορά ενός ιδιαίτερου τύπου γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα, που ονομάζεται γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (Double Fed Induction Generator). Στα άκρα του δρομέα συνδέεται ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα πηγών τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι συγκεκριμένες γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε συστήματα όπου ελέγχουν και τροφοδοτούν αντλίες μεταβλητής ταχύτητας, αλλά σε ένα μεγάλο εύρος συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε διατάξεις μεταβλητής ταχύτητας, έγκειται στην ικανότητα ρύθμισης της ταχύτητας της μηχανής, μέσω της ρύθμισης της συχνότητας των πηγών που συνδέονται στα άκρα του δρομέα. Στην επόμενη παράγραφο, αναλύεται λεπτομερώς ο τρόπος λειτουργίας της γεννήτριας διπλής τροφοδότησης[19].

Η γεννήτρια είναι τριφασική με N ζεύγη πόλων συνδεδεμένη στη συχνότητα f_1 . Η μαγνητική ροή που παράγεται από το κύκλωμα του στάτη περιστρέφεται με τη συνήθη σύγχρονη ταχύτητα n_s . Αν υποθεθεί ότι η ροή στρέφεται με την ωρολογιακή φορά για κάποιον ακίνητο εξωτερικό παρατηρητή, η ροή του πεδίου του στάτη θα στρέφεται με n_s . Εφόσον ο δρομέας είναι συνδεδεμένος με μια πηγή συχνότητας f_2 , η ροή του πεδίου του δρομέα θα περιστρέφεται με ταχύτητα n_2 . Για να «κλειδώσουν» μαγνητικά οι βόρειοι πόλοι του στάτη με τους νότιους πόλους του δρομέα, πρέπει να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα, όπως αυτή φαίνεται από ένα εξωτερικό παρατηρητή. Αυτό σημαίνει ότι για τον παρατηρητή η ροή του δρομέα πρέπει να περιστρέφεται με την ωρολογιακή φορά με n_s . Ο μόνος τρόπος για να συμβεί αυτό είναι να περιστρέφεται ο ίδιος ο δρομέας με ταχύτητα $n_s - n_2$ με ωρολογιακή φορά. Αν ο δρομέας περιστρεφόταν με οποιαδήποτε άλλη ταχύτητα, οι πόλοι του δρομέα θα ολίσθαιναν πίσω από τους πόλους του στάτη και η μέση ροπή θα ήταν μηδέν. Με τον τρόπο αυτό θα προκαλούνταν επιβράδυνση στο δρομέα και αυτός θα σταματούσε να περιστρέφεται [19].

Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει μόνο αν η ταχύτητά της είναι $(n_s - n_2)$ (υποσύγχρονη ταχύτητα). Αλλάζοντας δύο οποιουδήποτε ακροδέκτες που συνδέονται στους δακτυλίους ολίσθησης, μπορεί να προκληθεί περιστροφή του δρομέα αντίθετα προς την ωρολογιακή φορά, ως προς κάποιο εξωτερικό παρατηρητή. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι βόρειοι πόλοι του στάτη μπορούν να «κλειδώσουν» μαγνητικά με τους νότιους πόλους του δρομέα, μόνο εάν η ταχύτητα του δρομέα είναι $(n_s + n_2)$ (υπερσύγχρονη ταχύτητα) [19].

Η μετάβαση από υποσύγχρονη σε υπερσύγχρονη λειτουργία επηρεάζεται από τη μεταβολή της συχνότητας και της διαδοχής των φάσεων της πηγής τάσης που συνδέεται στο δρομέα [19].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Συστήματα Ελέγχου και Προστασίας Γεννητριών

3.1 Προστασία γεννήτριας

Η επιλογή του συστήματος προστασίας μιας γεννήτριας αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα, που χρίζει ιδιαίτερης μελέτης, διότι στην αντίθετη περίπτωση μπορεί να προκληθούν σοβαρά σφάλματα στη λειτουργία και στην ακεραιότητα των υποσυστημάτων της γεννήτριας. Σε πολλές περιπτώσεις, η προστασία των γεννητριών, μέσω απομόνωσης με τη χρήση ενός διακόπτη δε θεωρείται αρκετή, διότι η γεννήτρια εξακολουθεί να μεταδίδει ισχύ σε ένα βραχυκύκλωμα γης του τυλίγματος του στάτη, μέχρι τη στιγμή μηδενισμού του πεδίου διέγερσης. Κάποιες γεννήτριες διαθέτουν ένα ακόμα τριφασικό διακόπτη για την αποσύνδεση των τυλιγμάτων του στάτη από τον ουδέτερο (neutral), με σκοπό να διακόψουν τη διαδρομή του βραχυκυκλώματος. Για τη γενικότερη προστασία των γεννητριών υπάρχουν αρκετές μέθοδοι, οι οποίες αναλύονται στο τρέχον κεφάλαιο.

Πριν υλοποιηθεί μια καταγραφή των διαφόρων μεθόδων προστασίας των γεννητριών, γίνεται μια λεπτομερής αναφορά των πιθανότερων και πιο κρίσιμων τύπων βλαβών, που μπορούν να εμφανιστούν σε μία γεννήτρια. Στην ακόλουθη λίστα βλαβών παρατίθεται και η αγγλική ορολογία για τη διευκόλυνση στη μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας.

- Ηλεκτρικά σφάλματα (σφάλματα μεταξύ φάσεων ή σφάλματα γης) στα τυλίγματα του στάτη (phase or ground faults in the stator)
- Ηλεκτρικά σφάλματα (σφάλματα γης) στο δρομέα (ground faults in the rotor)
- Απώλεια πεδίου διέγερσης (Loss of field excitation)
- Υπερβολική μαγνητική ροή (Overexcitation)
- Ακούσια ενεργοποίηση ή ηλέκτριση (Inadvertent energization)
- Ασύμμετρη φόρτιση (Unbalanced currents)
- Λειτουργία υπό απαράδεκτη συχνότητα (Off-frequency operation)
- Μη εκκαθάριση σφαλμάτων συστήματος (Uncleared system faults)
- Υπέρταση (Overvoltage)
- Απώλεια συγχρονισμού (Loss of synchronism)
- Ταλαντώσεις υποσύγχρονης συχνότητας (Subsynchronous oscillations)

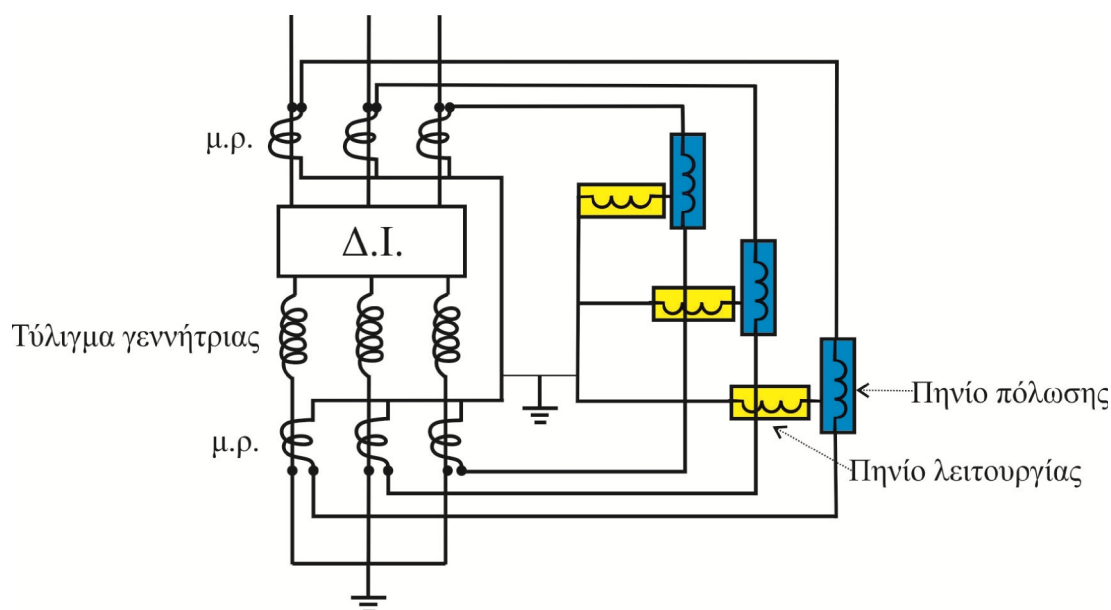
- Απώλεια σήματος Μ/Σ τάσης προς τους ηλεκτρονόμους και το ρυθμιστή τάσης (Loss of voltage transformer signal to relaying or voltage regulator)
- Αστοχία διακόπτη γεννήτριας (Generator breaker failure)
- Απώλεια της κινητήριας μονάδας (Loss of prime-mover)
- Υπερθέρμανση (Thermal overload)
- Υπερτάχυνση (Overspeeding)
- Παραμόρφωση δρομέα (Rotor distortion)
- Αποτυχία στη λίπανση της γεννήτριας (Lubrication oil failure)
- Υπερβολικοί κραδασμοί και ταλαντώσεις στα μηχανικά μέρη (Excessive vibration)

Για την αποφυγή των δυσάρεστων συνεπειών που μπορεί να προκύψουν από τη μη έγκαιρη διάγνωση και ξαφνική εμφάνιση των παραπάνω τύπων βλαβών, εφαρμόζονται σε όλες τις μονάδες παραγωγής διάφορα είδη προστασίας, τα βασικότερα των οποίων παρατίθενται στο τρέχον κεφάλαιο. Σημειώνεται, ότι οι προστασίες που αναφέρονται αφορούν κατά κόρον τις σύγχρονες γεννήτριες [31].

3.1.1 Προστασίες στάτη

3.1.1.1 Διαφορική προστασία

Κομβική μέθοδος προστασίας των τυλιγμάτων του στάτη. Είναι απαραίτητη για μεγάλες μονάδες παραγωγής (άνω των 10 MVA), αν και συχνά χρησιμοποιείται και σε μικρότερες (μέχρι και 1 MVA). Σε μικρότερης ισχύος γεννήτριες, όπου δε δύναται να εφαρμοστεί η διαφορική προστασία, χρησιμοποιείται συνήθως η προστασία υπερέντασης. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η μέθοδος συνδεσμολογίας του ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας. Με το αρκτικόλεξο «μ.ρ», συμβολίζεται ο μετασχηματιστής ρεύματος. Η τρέχουσα μέθοδος, δε μπορεί να εντοπίσει και να αποτρέψει σφάλματα μεταξύ των σπειρών της ίδιας φάσης, καθώς δεν εμφανίζεται διαφορά ρευμάτων στους ακροδέκτες των τυλιγμάτων. Για να μπορεί να υπάρξει σύγκριση μεταξύ των εισερχομένων και εξερχομένων ρευμάτων τους, το τύλιγμα κάθε φάσης χωρίζεται σε δύο παράλληλους κλάδους (split-winding generators) [31].



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση διαφορικής προστασίας γεννητριών [31]

3.1.1.2 Δευτερεύουσα προστασία (Backup protection)

Η δευτερεύουσα προστασία στις γεννήτριες υλοποιείται μέσω της ελεγχόμενης προστασίας υπερέντασης από τάση (Voltage-controlled ή voltage-restrained time - overcurrent protection), η οποία είναι υπεύθυνη για την προστασία από τριφασικά βραχυκυκλώματα ή μέσω της προστασίας απόστασης (Phase-distance protection).

3.1.1.3 Προστασία στάτη έναντι σφαλμάτων γης (Stator ground-fault protection)

Η εν λόγω προστασία παρέχεται σε περιπτώσεις που η γείωση της γεννήτριας γίνεται μέσω σύνθετης αντίστασης, η οποία περιορίζει το ρεύμα σφάλματος γης, σε τιμές μικρότερες από την τιμή που έχει οριστεί ως το κατώφλι της διαφορικής προστασίας ή της προστασίας υπερέντασης. Η μελέτη και η κατάλληλη ρύθμιση αυτού του είδους προστασίας εξαρτάται από τη μέθοδο γείωσης και τον τρόπο σύνδεσης με το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Τα βασικά στοιχεία της προστασίας σφάλματος γης στάτη είναι:

- Ο στιγμιαίος και αντιστρόφου χρόνου ηλεκτρονόμος υπερέντασης
- Το διαφορικό στοιχείο
- Οι ηλεκτρονόμοι υπέρτασης και υπότασης

3.1.1.4 Προστασία υπέρτασης (Overvoltage protection)

Η προστασία υπέρτασης προλαμβάνει τη διάδοση υπέρτασης μέσα στην ηλεκτρική εγκατάσταση, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει ισχυρή βλάβη σε μη επαρκώς προστατευόμενο εξοπλισμό. Κύριο λόγος εμφάνισης των συγκεκριμένων υπερτάσεων είναι η στιγμιαία απώλεια μεγάλου φορτίου που τροφοδοτεί η γεννήτρια. Το γεγονός αυτό προκαλεί

υψηλής έντασης ρεύμα διέγερσης, που με τη σειρά του οδηγεί σε κορεσμό των σιδηρών περιοχών της γεννήτριας. Τέτοιου είδους ραγδαίες αλλαγές, προκαλούν μεγάλα επίπεδα απωλειών και υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γεννήτριας, που τελικά επιφέρουν τη μερική ή την ολική καταστροφή αυτής. Σε περίπτωση παρουσίας υπέρτασης, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης και ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών ενεργοποιούνται, ώστε να αποτρέψουν τις δυσμενείς αυτές συνθήκες. Εάν αποτύχει η ενεργοποίησή τους, τότε τίθεται σε λειτουργία ο ηλεκτρονόμος υπέρτασης [31].

3.1.1.5 Προστασία υπότασης (Undervoltage protection)

Η συγκεκριμένη μέθοδος προστασίας, τίθεται σε εφαρμογή σπανιότερα. Συνήθως, οι ηλεκτρονόμοι υπότασης έχουν το ρόλο του μανδαλωτή (latch) σε άλλα σχήματα προστασίας, όπως η προστασία απώλειας πεδίου ή ακούσιας ενεργοποίησης, όπου η προς ανίχνευση ανωμαλία οδηγεί άμεσα ή έμμεσα σε κατάσταση υπότασης.

3.1.1.6 Προστασία ισχύος αντίστροφης φοράς (Reverse power protection)

Στην περίπτωση όπου η κινητήρια μηχανή της μονάδας παραγωγής έχει απεμπλακεί από τη γεννήτρια, ενώ αυτή βρίσκεται συνδεδεμένη στο δίκτυο, με παράλληλη λειτουργία του κυκλώματος διέγερσής της, ελλοχεύει με μεγάλη πιθανότητα η μετατροπή της γεννήτριας σε κινητήρα, αφού απορροφά μεγάλα ποσά ισχύος από το δίκτυο. Η εν λόγω κατάσταση δεν είναι πάντα καταστροφική για τη γεννήτρια, όμως κατά πάσα πιθανότητα θα καταστεί επίπονη για το κινητήριο σύστημά της. Ο παραπάνω κίνδυνος ελλοχεύει κυρίως σε συστήματα ατμοστρόβιλων και υδροστρόβιλων.

3.1.1.7 Προστασία από ρεύματα αρνητικής ακολουθίας (Negative-sequence current protection)

Η ασύμμετρη φόρτιση της γεννήτριας ή αργοπορημένη διάγνωση ασύμμετρων σφαλμάτων στο δίκτυο το οποίο τροφοδοτεί τη γεννήτρια, οδηγεί με ακρίβεια στην εμφάνιση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας στα τυλίγματα του στάτη. Τα ρεύματα αυτά επάγονται στο δρομέα, όπου εμφανίζονται ως δινορρέυματα διπλάσιας συχνότητας. Τα δινορρέυματα προκαλούν υπερθέρμανση και μπορούν να καταστρέψουν το δρομέα, αν η διάρκειά τους περάσει ένα επιτρεπτό κατώφλι. Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους φαινόμενα, χρησιμοποιούνται ευρέως στοιχεία υπέρεντασης αντίστροφου χρόνου, που λειτουργούν για ρεύματα αρνητικής ακολουθίας, με χαρακτηριστική καμπύλη που δίνεται από τη σχέση:

$$I_2^2 \cdot t = K \quad (3.1)$$

Συχνά, χρησιμοποιούνται σημάσεις (alarms), όταν η ένταση του ρεύματος I_2 κυμαίνεται εντός του διαστήματος 0,03 – 0,2Α. Η τιμή της σταθεράς K μεταβάλλεται σύμφωνα με τον τύπο της εκάστοτε γεννήτριας.

3.1.1.8 Προστασία έναντι ακούσιας ενεργοποίησης (Inadvertent energization protection)

Κατά την περίπτωση ακούσιας ενεργοποίησης μιας γεννήτριας, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να προκληθούν μη αναστρέψιμες βλάβες στα σιδηρά της μέρη, από την απότομη υπερθέρμανση. Ο τρόπος προστασίας από τη συγκεκριμένη μη επιθυμητή κατάσταση, γίνεται χρήση τριών ηλεκτρονόμων υπερέντασης αντίστροφου χρόνου, ένα για κάθε φάση, με σκοπό την ενεργοποίησή τους όταν ανιχνεύεται ροή ισχύος αντίστροφης φοράς. Συγκριτικά με την προστασία ισχύος αντίστροφης φοράς, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά πιο αποτελεσματική, καθώς παρουσιάζει ισχυρότερη προστασία κατά την ενεργοποίηση. Υπάρχουν και άλλα στοιχεία που μπορούν να προσφέρουν ανάλογη προστασία, όπως οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης ελεγχόμενοι από συχνότητα ή από τάση (frequency or voltage supervised overcurrent relays) [31].

3.1.1.9 Προστασία υπερβολικής ροής (Volts/Hertz Protection)

Η μαγνητική ροή σε μια γεννήτρια και γενικά σε όλα τα είδη εξοπλισμού που αποτελούνται από πυρήνα σιδήρου, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$e = N(d\phi/dt) \Rightarrow \sqrt{2}V_{rms} \cos(\omega t) = N(d\phi/dt) \Rightarrow \phi(t) = \frac{\sqrt{2}V_{rms}}{N\omega} \sin(\omega t) \Rightarrow \quad (3.2)$$
$$\Phi_{max} = \frac{\sqrt{2}V_{rms}}{N2\pi f} \Rightarrow \Phi_{max} = \alpha \frac{V}{f}$$

Από την παραπάνω σχέση, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η εμφάνιση υπέρτασης ή η εμφάνιση χαμηλής συχνότητας ή και των δύο ταυτόχρονα για παρατεταμένο χρονικό διάστημα δύναται να προκαλέσει σοβαρές βλάβες σε αυτή. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται τα στοιχεία Volts/Hertz με ρύθμιση σταθερού ή αντίστροφου χρόνου ή συνδυασμού και των δύο, στην περίπτωση γεννητριών μεγαλύτερης ισχύος.

3.1.1.10 Προστασία έναντι απαράδεκτης συχνότητας (Abnormal frequency protection)

Συνθήκες υπερσυχνότητας ή υποσυχνότητας, δηλαδή συνθήκες με συχνότητες πάνω ή κάτω αντίστοιχα από την ονομαστική συχνότητα, μπορούν να παρουσιαστούν κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος σε μια γραμμή μεταφοράς. Η συγκεκριμένη κατάσταση οδηγεί στην υπερφόρτιση του ενός μέρους του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και την υποφόρτιση του υπόλοιπου συστήματος, με αποτέλεσμα να προκληθούν ισχυρά επίπεδα βλαβών στην κινητήρια μονάδα. Η συχνότητα της γεννήτριας, μεταβάλλεται μέσω του ρυθμιστή στροφών (speed variator) του κινητήριου συστήματος και ο έλεγχος της συχνότητας υλοποιείται με τη βοήθεια ηλεκτρονόμου, που διακόπτει τη λειτουργία των γεννητριών, όταν διέρχονται συχνότητες εκτός των προδιαγεγραμμένων ορίων για περισσότερο από ένα επιθυμητό χρονικό κατώφλι.

3.1.1.11 Προστασία έναντι απώλειας συγχρονισμού (Loss of synchronism protection)

Είναι πιθανό κατά τη διάρκεια εσφαλμένης λειτουργίας της γεννήτριας να παρατηρηθεί απώλεια συγχρονισμού (out-of-step conditions). Αυτό μπορεί να συμβεί για διάφορους λόγους, όπως για παράδειγμα λόγω της απώλειας του πεδίου διέγερσης και είναι επιτακτική η ανάγκη απομόνωσης της γεννήτριας, αν δε διορθωθεί έγκαιρα.

3.1.2 Προστασίες δρομέα

3.1.2.1 Προστασία δρομέα έναντι σφαλμάτων γης στο κύκλωμα διέγερσης (Field ground protection)

Το τυλίγμα διέγερσης είναι κατά κανόνα αγείοτο (DC κύκλωμα). Η εμφάνιση σφάλματος γης σε ένα σημείο του, δεν προκαλεί αρχικά κάποιο πρόβλημα λειτουργίας στη γεννήτρια. Η εκδήλωση όμως ενός επιπρόσθετου σφάλματος γης, σε κάποιο άλλο σημείο του τυλίγματος διέγερσης, θα είχε σαν αποτέλεσμα, ένα μέρος του τυλίγματος να είναι βραχυκυκλωμένο, με συνέπεια την ανάπτυξη επικίνδυνων θερμοκρασιών στο δρομέα και την εμφάνιση επιβλαβών μηχανικών ταλαντώσεων στο σώμα του.

3.1.2.2 Προστασία έναντι απώλειας πεδίου διέγερσης (Loss of field protection)

Σε περίπτωση που η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και υπάρξει διακοπή της διέγερσής της, η γεννήτρια θα συνεχίσει να στρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, γεγονός το οποίο θα οδηγήσει στη λειτουργία της γεννήτριας ως ασύγχρονη. Έτσι, επάγονται ρεύματα υψηλής έντασης στο δρομέα της μηχανής, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση αυτού και την καταστροφή του, αν παραμείνει σε αυτή την κατάσταση για ένα χρονικό διάστημα, πέρα από τα όρια ανοχής. Τέλος, καθώς η γεννήτρια θα βρίσκεται σε κατάσταση παροχής ενεργού ισχύος στο σύστημα, θα «τραβάει» άεργο ισχύ. Υπό αυτές τις συνθήκες η τιμή της έντασης του στάτη αυξάνεται έως τέσσερις φορές πάνω από την ονομαστική ένταση ρεύματος, με παράλληλη σημαντική πτώση της τάσεως. Συνεπώς, ο συγκεκριμένος τρόπος προστασίας είναι εξαιρετικά χρήσιμος για τα ασφαλή επίπεδα λειτουργίας των γεννητριών [31].

3.1.3 Προστασίες έναντι μηχανικών καταπονήσεων

3.1.3.1 Προστασία υπερθέρμανσης στάτη (Thermal overload protection)

Υπερθέρμανση στο στάτη της γεννήτριας μπορεί να προκληθεί από π.χ. υπερφόρτιση, αποτυχία συστήματος ψύξης, υπερβολική ροή, σφάλματα πυρήνα κ.α. Συνήθως, οι μεγάλες γεννήτριες διαθέτουν ανιχνευτές θερμοκρασίας στα τυλίγματά τους (Resistance Temperature Detectors, RTDs), οι οποίοι στέλνουν σήμα στον ηλεκτρονόμο υπερθέρμανσης και αυτός με τη σειρά του ενεργοποιεί ένα σήμα κινδύνου (alarm) ή σήμα για ενεργοποίηση της προστασίας (trip).

3.1.3.2 Προστασία υπερτάχυνσης (Overspeeding protection)

Η ταχύτητα σε μια στροβιλογεννήτρια αυξάνεται όταν η είσοδος του ατμού υπερβαίνει την απαραίτητη ποσότητα για την οδήγηση του φορτίου υπό ονομαστική συχνότητα. Μέσω του ρυθμιστή στροφών μπορεί να ελέγχεται και να ρυθμίζεται η ταχύτητα του κινητήριου συστήματος και κατά συνέπεια και του δρομέα, όπως έχουμε προαναφέρει. Σε περιπτώσεις, όμως, απόρριψης μεγάλου φορτίου, η γεννήτρια αρχίζει και επιταχύνει ραγδαία, με αποτέλεσμα τη μηχανική καταπόνηση του δρομέα και κατά συνέπεια την ενεργοποίηση των σχετιζόμενων προστασιών.

3.1.3.3 Προστασία απώλειας κενού συμπυκνωτή (Loss of condenser vacuum)

Η απώλεια του κενού στους συμπυκνωτές μονάδων παραγωγής με ατμοστρόβιλους έχει ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση των αγωγών ατμού και την ανύψωση της θερμοκρασίας στο τμήμα χαμηλής πίεσης του στροβίλου. Στην περίπτωση αυτή, η προστασία απώλειας κενού συμπυκνωτή θα δώσει σήμα να ανοίξουν οι ασφαλιστικές βαλβίδες εκτόνωσης του στροβίλου καθώς και ο διακόπτης ισχύος της γεννήτριας.

3.2 Έλεγχος γεννήτριας

Η ρύθμιση και ο έλεγχος της τάσης είναι απαραίτητες διαδικασίες για τη διασφάλιση της ευστάθειας της τάσης, συνθήκη αναγκαία και ικανή για τη σύνδεση μιας γεννήτριας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Για να ελεγχθούν και να αντιμετωπιστούν άμεσα καταστάσεις βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, συνήθως γίνεται εγκατάσταση δυναμικών συστημάτων άεργου αντιστάθμισης, όπως για παράδειγμα τα στατικά συστήματα άεργου αντιστάθμισης (Static Var Compensators - SVCs).

Τα προαναφερθέντα συστήματα μπορούν να ρυθμίσουν άμεσα τις τοπικές τάσεις, ενώ παράλληλα παρέχουν μια προστασία έναντι των υπερτάσεων που προκαλούνται κατά τη σύζευξη των μηχανικά ελεγχόμενων συστοιχιών πυκνωτών. Μια άλλη εξαιρετική μέθοδος για την αντιμετώπιση καταστάσεων αστάθειας τάσης είναι η αποσύνδεση των μηχανών επαγωγής. Η συγκεκριμένη βαθμίδα προστασίας, ενεργοποιείται μόνο σε καταστάσεις απόρριψης φορτίου. Ειδικότερα, οι μεγάλοι βιομηχανικοί κινητήρες έχουν συνήθως συστήματα προστασίας από χαμηλή τάση, τα οποία αποσυνδέουν τον κινητήρα από το δίκτυο κατά τη χρονική στιγμή εμφάνισης χαμηλών επιπέδων τάσης, με σκοπό να αποτραπεί μία πιθανή επιβράδυνση (ή επιτάχυνση). Σε αντίθεση με αυτούς τους κινητήρες, οι μικρότερης ισχύος διαθέτουν κάποια θερμικά στοιχεία προστασίας, τα οποία εμφανίζουν αποκρίσεις, της τάξεως κάποιων δευτερολέπτων. Κατά συνέπεια, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα δυσμενούς εξέλιξης του φαινομένου της αστάθειας τάσης, πριν την ενεργοποίηση των στοιχείων προστασίας, γεγονός που συμβάλει στον αποσυγχρονισμό των σύγχρονων γεννητριών [31].

3.2.1 Ελεγκτές τάσης

3.2.1.1 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης

Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης αποτελεί μια διάταξη ελέγχου, η οποία διατηρεί σε σταθερά (ή σχεδόν σταθερά) επίπεδα την τερματική τάση της γεννήτριας. Το μέτρο V_t της τερματικής τάσης της γεννήτριας μετράται με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή τάσης και στη συνέχεια ανορθώνεται ώστε να παραχθεί ένα συνεχές σήμα, το οποίο είναι ανάλογο με την ενεργό τιμή της εναλλασσόμενης τερματικής τάσης. Με Z_c συμβολίζεται η σύνθετη αντίσταση αντιστάθμισης, ενώ το εξερχόμενο ρεύμα στάτη της σύγχρονης γεννήτριας μετράται με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή έντασης. Το σήμα V_c συγκρίνεται με μία τάση αναφοράς V_{ref} , η οποία αφορά το επίπεδο στο οποίο καλείται να επέλθει η τερματική τάση. Η αρχική κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας λαμβάνεται για να αποτελέσει βοηθητικό στοιχείο των υπολογισμών της τάσης αναφοράς. Η διαφορά $V_{ref} - V_c$ χρησιμοποιείται ως είσοδος στην κύρια μονάδα του ρυθμιστή, με σκοπό να αυξηθεί η τάση διέγερσης της γεννήτριας.

Ειδικότερα, η κύρια μονάδα του ρυθμιστή ενισχύει το παραπάνω σφάλμα και το διαμορφώνει κατάλληλα για να εισαχθεί στο σύστημα διέγερσης. Η διεγέρτρια αποτελεί ένα στοιχείο, το οποίο προσφέρει συνεχή τάση στο τύλιγμα του στάτη της μηχανής. Στον αθροιστή του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης μπορεί να προστεθεί σήμα από το σταθεροποιητή ισχύος του συστήματος (Power System Stabilizer), ο οποίος αποτελεί μία διάταξη που ενεργοποιείται σε μεταβατικές καταστάσεις. Κατά τη μόνιμη κατάσταση, ο σταθεροποιητής ισχύος του συστήματος δεν επηρεάζει την τερματική τάση της γεννήτριας, καθώς έχει μηδενική έξοδο.

Επιπρόσθετα, ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης συνοδεύεται από διάφορα συστήματα περιορισμού, όπως:

- Το Σύστημα Προστασίας Υποδιεγέρσεως (underexcitation limiter), το οποίο εμποδίζει τη μείωση του ρεύματος διέγερσης κάτω από ένα όριο (το οποίο αντιστοιχεί σε συνθήκες απορρόφησης άεργου ισχύος) για λόγους ευστάθειας.
- Τον Περιοριστή Τάσης/Συχνότητας (Volts-per-Hertz limiter), ο οποίος προστατεύει τη γεννήτρια και το μετασχηματιστή ανύψωσης από την πλεονάζουσα μαγνητική ροή, η οποία μπορεί να προκληθεί από υπερτάσεις ή από χαμηλές συχνότητες.
- Το Σύστημα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (overexcitation limiter), το οποίο προστατεύει το τύλιγμα πεδίου από υπερθέρμανση σε περιπτώσεις υψηλού ρεύματος διέγερσεως.
- Τον Περιοριστή Ρεύματος Τυμπάνου (armature current limiter), ο οποίος προστατεύει το τύλιγμα του τυμπάνου από υπερεντάσεις. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αυτόματων ρυθμιστών τάσης σε όλον τον κόσμο από διάφορες κατασκευάστριες εταιρείες.

3.2.1.2 Μοντέλο Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης με διεγέρτρια Συνεχούς Ρεύματος

Στο μοντέλο του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης με διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος, υφίσταται ένας εσωτερικός βρόχος σταθεροποίησης με διαφορικό κέρδος K_F και χρονική σταθερά T_F . Από το συγκεκριμένο βρόχο παράγεται ένα σήμα ανατροφοδότησης V_F και αφαιρείται από το σήμα του κύριου αθροιστή εισόδου του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης. Στη μόνιμη κατάσταση, το σήμα V_F , αλλά και τα σήματα που εξάγονται από τα λοιπά υποσυστήματα του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης, είναι μηδενικά.

Συνεχίζοντας τη διαδικασία, το σήμα εξόδου του αθροιστή εισέρχεται στη μονάδα ρύθμισης της τάσεως. Η μονάδα αυτή αποτελείται από ένα φίλτρο μεταπορείας ($T_B > T_C$) και το ρυθμιστή τάσης. Ο ρυθμιστής τάσης περιγράφεται από μία συνάρτηση μεταφοράς 1^{ου} βαθμού με κέρδος K_A και χρονική σταθερά T_A . Η έξοδος V_R του ρυθμιστή βρίσκεται εντός των στενών ορίων μίας μέγιστης ($V_{R,max}$) και μίας ελάχιστης ($V_{R,min}$) τιμής. Το φίλτρο μεταπορείας (lag-lead filter) χρησιμοποιείται για να επιτύχει μια γενικότερη μείωση του συνολικού κέρδους διέγερσης στις μεσαίες συχνότητες. Μεγάλα κέρδη διέγερσης οδηγούν το σύστημα σε μια ασταθή κατάσταση. Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης, που περιεγράφηκε σε αυτή την παράγραφο διαθέτει ένα κέρδος K_T στις μεσαίες συχνότητες, η τιμή του οποίου ισούται με:

$$K_T = \frac{T_c}{T_B} K_A \quad (3.3)$$

Η έξοδος V_R του ρυθμιστή τροφοδοτεί τη διεγέρτρια τις σύγχρονης μηχανής, η οποία παριστάνεται με μία χρονική σταθερά T_E , μία απλή σταθερά K_E και μία συνάρτηση κορεσμού S_E .

Οι καταστάσεις του συγκεκριμένου μοντέλου Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης περιγράφονται από τις εξής μεταβλητές:

- Τη μεταβλητή x_{IB} , η οποία συνδέεται με το φίλτρο μεταπορείας.
- Την έξοδο του ρυθμιστή τάσης V_R .
- Τη μεταβλητή x_{sF} , η οποία συνδέεται με το βρόχο σταθεροποίησης.
- Την τάση διεγέρσεως E_f , η οποία είναι και η έξοδος του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης.

3.2.1.3 Μοντέλο Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης με διεγέρτρια Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Το σύστημα διέγερσης του συγκεκριμένου τύπου Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης αποτελείται από μία ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη με διακοπτικά στοιχεία σε συνδεσμολογία γέφυρας, η οποία τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση. Η σταθερά T_A αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση τις ρύθμισης, καθώς και τα φίλτρα για τη μέτρηση του σήματος εισόδου. Η σταθερά K_A αντιπροσωπεύει το ολικό κέρδος στη μόνιμη κατάσταση του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης [31].

Ομοίως με το μοντέλο Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης με διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος, χρησιμοποιείται και εδώ ένα φίλτρο μεταπορείας ($T_B > T_C$). Οι καταστάσεις του

συγκεκριμένου μοντέλου Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης περιγράφονται από τις εξής μεταβλητές:

- Τη μεταβλητή x_{11} , η οποία συνδέεται με το φίλτρο μεταπορείας.
- Την τάση διεγέρσεως E_f , η οποία είναι και η έξοδος του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης.

3.2.1.4 Μοντέλο Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης με Διεγέρτρια Στατικού Τύπου

Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει το φίλτρο μεταπορείας, το ρυθμιστή τάσης, και τους βρόχους σταθεροποίησης. Οι διεγέρτριες αυτού του τύπου παρουσιάζουν εκ κατασκευής εξαιρετικά μικρές σταθερές χρόνου, οπότε η δεσπόζουσα σταθερά χρόνου προέρχεται από τα φίλτρα μετρήσεων. Οι καταστάσεις του συγκεκριμένου μοντέλου Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης περιγράφονται από τις εξής μεταβλητές:

- Τη μεταβλητή x_{11} , η οποία συνδέεται με το φίλτρο μεταπορείας.
- Τη μεταβλητή x_{sf} , η οποία συνδέεται με το βρόχο σταθεροποίησης.
- Την τάση διεγέρσεως E_f , η οποία είναι και η έξοδος του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης.

3.2.2 Ελεγκτές συχνότητας

Οι ελεγκτές συχνότητας αποτελούν διατάξεις βαρύνουσας σημαντικότητας για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και τις ευρύτερες διατάξεις αυτών. Παρουσιάζονται μόνο ως τμήματα διατάξεων ρύθμισης και ελέγχου της ισχύος ή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας.

3.2.2.1 Σταθεροποιητές Συστήματος Ισχύος

Ο σταθεροποιητής ισχύος του συστήματος (Power System Stabilizer) αποτελεί ένα υποσύστημα που συνεργάζεται με το σύστημα διέγερσης μιας σύγχρονης γεννήτριας, παρέχοντας επιπλέον ροπή απόσβεσης στις ταλαντώσεις του δρομέα, εντός επιθυμητού κλειστού διαστήματος συχνοτήτων. Υπό αυτή την έννοια, ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος δημιουργεί μία συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής, η οποία είναι συμφασική με την εκάστοτε απόκλιση της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας. Ο σταθεροποιητής ισχύος του συστήματος, όπως προκύπτει και από την ίδια του την ονομασία, σταθεροποιεί τη γεννήτρια κατά την μεταβατική της κατάσταση, χωρίς να επηρεάζει την τάση μόνιμης κατάστασης.

Σαν είσοδοι του σταθεροποιητή ισχύος του συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σήματα ανάλογα είτε της ταχύτητας του δρομέα, είτε της συχνότητας εξόδου. Η ροπή απόσβεσης των γεννητριών ελαχιστοποιείται σε συνθήκες πλήρους φόρτισης του συστήματος. Αν σε αυτές τις συνθήκες συμβεί μια διαταραχή και το δίκτυο «πέσει» είναι πιθανή η εμφάνιση μη αποσβενύμενων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων μεταξύ των γεννητριών. Η δράση των σταθεροποιητών σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης προσφέρει απόσβεση ταλαντώσεων και ευσταθή λειτουργία στο σύστημα. Η μελέτη και η σχεδίαση των

σταθεροποιητών, υλοποιείται για ένα μόνο σημείο λειτουργίας, κατά το οποίο το σύστημα βρίσκεται σε πλήρη φόρτιση και οι ρυθμιστές τάσης έχουν μεγάλες τιμές κέρδους, ώστε να μπορεί να εξασφαλίσει την πλήρη απόσβεση των ταλαντώσεων κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής του συστήματος [31].

Μετά τη διασφάλιση της λειτουργίας του συστήματος σε συνθήκες ευστάθειας και μέγιστης φόρτισης, εκτελείται μια ανάλυση που αφορά τους ρυθμούς απόκρισής του. Στόχος της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι η εύρεση των ηλεκτρομηχανικών ρυθμών που πρέπει να αποσβεστούν επιπλέον. Ειδικότερα, εκτελούνται σειριακά τα εξής βήματα:

1. Επιλέγεται η γεννήτρια στην οποία θα πρέπει να εγκατασταθεί ο σταθεροποιητής, στοχεύοντας στην περαιτέρω απόσβεση συγκεκριμένου ηλεκτρομηχανικού ρυθμού.
2. Υπολογίζεται η γωνία αντιστάθμισης και η συνάρτηση μεταφοράς του σταθεροποιητή.
3. Εν κατακλείδι, υπολογίζεται το κέρδος του σταθεροποιητή.

Το μοντέλο αυτό λαμβάνει ως είσοδο την ανά μονάδα απόκλιση της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα και αποτελείται από ένα υψηλερατό φίλτρο, δύο διατάξεις αντιστάθμισης φάσης και μία βαθμίδα κέρδους. Το σήμα εξόδου V_{PSS} του σταθεροποιητή ισχύος του συστήματος προστίθεται στον κύριο αθροιστή του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης. Το υψηλερατό φίλτρο έχει μία μεγάλη σταθερά χρόνου T_w ώστε να επιτρέπει τη διέλευση των σημάτων που αφορούν τις ταλαντώσεις της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα. Σε περίπτωση απουσίας του φίλτρου, η μεταβολή της τερματικής τάσης της γεννήτριας θα ήταν στενά εξαρτημένη από τις μεταβολές της ταχύτητας του δρομέα της. Έτσι, η λειτουργία του φίλτρου βοηθάει στην επιλεκτική ενεργοποίηση του σταθεροποιητή, όταν κρίνεται ότι υφίστανται μεγάλες ταλαντώσεις της σύγχρονης ταχύτητας.

Στα πλαίσια της ίδιας φιλοσοφίας, κάθε διάταξη αντιστάθμισης φάσης δημιουργεί την επιθυμητή γωνία προπορείας ($T_1 > T_2$ και $T_3 > T_4$) με απώτερο σκοπό την αντιστάθμιση της διαφοράς φάσης μεταξύ της εισόδου και της ροπής εξόδου. Στα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως δύο ή περισσότερες βαθμίδες αντιστάθμισης φάσης. Το εύρος των συχνοτήτων των ταλαντώσεων που πρέπει να εξαλειφθούν, βρίσκεται εντός του διαστήματος 0.1 με 2Hz και ο σχεδιασμός του υποσυστήματος αντιστάθμισης εκτελείται με βάση την παραπάνω περιοριστική συνθήκη. Στο σημείο αυτό, τονίζεται ότι δεν είναι εφικτό να υλοποιηθεί μια πλήρης αντιστάθμιση φάσης και για το λόγο αυτό ο σταθεροποιητής ισχύος είναι ικανός να αλλάζει και τη ροπή συγχρονισμού. Όσο αφορά τη βαθμίδα κέρδους, η χρησιμότητά της είναι να αποφασίζει το μέγεθος της απόσβεσης που ορίζεται από τη διάταξη του σταθεροποιητή ισχύος του συστήματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος K_{PSS} , τόσο μεγαλύτερη ροπή απόσβεσης εισαγάγεται από τη συγκεκριμένη διάταξη. Υπάρχει όμως ένα trade-off, το οποίο επιβάλλει ένα κατώφλι τη μέγιστη τιμή του κέρδους. Ωστόσο, για λόγους ευστάθειας και λόγω του περιοριστή το παραπάνω κέρδος δεν μπορεί να ξεπεράσει μία μέγιστη τιμή. Οι καταστάσεις του συγκεκριμένου μοντέλου περιγράφονται από τις εξής μεταβλητές:

- Τη μεταβλητή, η οποία συνδέεται με το υψηλερατό φίλτρο στην είσοδο ($PSSW_x$).
- Τις μεταβλητές, οι οποίες συνδέονται με τις δύο βαθμίδες αντιστάθμισης φάσης ($PSSx1$ και $PSSx2$).

3.2.3 Έλεγχος στροφών γεννήτριας

Ο στόχος του συστήματος ρύθμισης στροφών της γεννήτριας, είναι η ρύθμιση των βαλβίδων εισαγωγής του στροβίλου ώστε να εξισωθεί η μηχανική με την ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας. Βάσει της λειτουργίας της εκάστοτε μονάδας και των επιθυμητών επιπέδων ελέγχου, χρησιμοποιούνται δύο τύποι ελέγχου, ο τύπου «πτώσης» και ο τύπου «συχνότητας». Ο έλεγχος τύπου πτώσης (γωνιακή ταχύτητα/φορτίο), συμπεριφέρεται με μία χαρακτηριστική καμπύλη που παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τη συμπεριφορά της μηχανής να ρίχνει τις στροφές της, όταν υπάρχει αύξηση φορτίου. Στις σύγχρονες μηχανές, η λειτουργία του ρυθμίζεται στη συχνότητα του συστήματος. Επί της ουσίας, επιτελείται μια μετατροπή του ρυθμιστή στροφών τύπου πτώσης σε ένα ελεγκτή φορτίου. Με την αύξηση του φορτίου, δίνεται ένα σήμα από το ρυθμιστή στροφών να ανοίξουν οι βαλβίδες εισαγωγής, έτσι ώστε να διατηρηθούν οι στροφές και να εξυπηρετηθεί το επιπρόσθετο φορτίο του συστήματος. Ο έλεγχος του ρυθμιστή στροφών τύπου πτώσης, αποτρέπει την επιφόρτιση μίας μόνο γεννήτριας με το επιπλέον φορτίο, το οποίο ισομοιράζεται στις υπόλοιπες μονάδες, με αποτέλεσμα την αυξημένη ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ισόχρονος (συχνότητας) τύπος ελέγχου του ρυθμιστή στροφών, χρησιμοποιείται για τη λειτουργία μονάδων οι οποίες είναι απομονωμένες από το σύστημα. Επιτελείται έτσι, ρύθμιση της συχνότητας σε μία τιμή αναφοράς. Σε περιπτώσεις απομακρυσμένων περιοχών, χρησιμοποιείται κατά κόρον ο συγκεκριμένος τύπος ελέγχου, ώστε να μεταβληθεί η συχνότητα στα επίπεδα της ονομαστικής της τιμής. Αντίθετα, κατά τη λειτουργία μεγάλης κλίμακας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιείται ο έλεγχος στροφών τύπου πτώσης [31].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την βιβλιογραφική ανασκόπηση και την εκτενή ανάλυση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλεκτρικές γεννήτριες είναι εμφανές πως τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος είναι πιο απλά, ισχυρά και δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες δυσκολίες επισκευής και συντήρησης κατά τη διάρκεια της χρήσης τους, συγκριτικά με τα συστήματα συνεχούς ρεύματος.

Τονίζεται επίσης, ότι σε πολλές χώρες η υιοθέτηση νέων ενεργειακών πολιτικών σχετίζεται με την επιβολή ποινών σε συστήματα παραγωγής ενέργειας, που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Συνεπώς, η ανάπτυξη και εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που υποκαθιστούν τις καθιερωμένες ενεργειακές πηγές, πολλές από τις οποίες εξαντλούνται ταχύτατα, αποτελεί το βασικό στοιχείο της ενεργειακής πολιτικής των τεχνολογικά ανεπτυγμένων χωρών. Από την άλλη πλευρά, το γεγονός ότι οι τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι εξαρτώμενες από μια πηγή η οποία δεν είναι ελεγχόμενη έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορεί να γίνει, πέραν της εγκατάστασης των ενεργειακών τεχνολογιών, που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, με τη χρήση τεχνολογιών αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, που λειτουργούν ως ένα μέσο εξισορρόπησης της ενέργειας του συστήματος. Οι ηλεκτρικές γεννήτριες αποτελούν το βασικό πυρήνα των συστημάτων παραγωγής ενέργειας των προαναφερθέντων συστημάτων (εκτός βέβαια από τα φωτοβολταϊκά συστήματα).

Οι γεννήτριες διαχωρίζονται σε γεννήτριες συνεχούς και γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, δε διαφέρουν καθόλου ως προς την κατασκευή τους, από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Η μόνη διαφορά είναι, ότι από τις ψήκτρες της γεννήτριας παραλαμβάνεται συνεχές ρεύμα, ενώ στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος προσδίδεται στις ψήκτρες συνεχές ρεύμα και παραλαμβάνεται από τον άξονα τους μηχανική ενέργεια. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χωρίζονται περαιτέρω σε γεννήτριες με εξωτερική διέγερση, στις οποίες η περιέλιξη διεγέρσεως τροφοδοτείται από μία ξένη πηγή και σε γεννήτριες με αυτοδιέγερση. Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι δύο ειδών. Οι σύγχρονες γεννήτριες ή εναλλακτικές και οι ασύγχρονες γεννήτριες. Η σύγχρονη γεννήτρια είναι σύγχρονη μηχανή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η σύγχρονη μηχανή χρησιμοποιούμενη ως γεννήτρια είναι η σπουδαιότερη μηχανή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί το επίκεντρο κάθε σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής τάσεως. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση των ασύγχρονων γεννητριών καθιερώθηκε ευρύτατα, κυρίως με την ανάπτυξη της χρήσης ανεμογεννητριών ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των

ασύγχρονων γεννητριών είναι ότι δεν μπορούν να παράγουν άεργο ισχύ. Για το λόγο αυτό, απαιτείται μια εξωτερική πηγή άεργου ισχύος μόνιμα συνδεδεμένης.

Τέλος, διαπιστώνεται η σημασία και η σπουδαιότητα της σωστής επιλογής του συστήματος προστασίας μιας γεννήτριας. Η επιλογή του συστήματος προστασίας μιας γεννήτριας αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα, που χρίζει ιδιαίτερης μελέτης, διότι στην αντίθετη περίπτωση μπορεί να προκληθούν σοβαρά σφάλματα στη λειτουργία και στην ακεραιότητα των υποσυστημάτων της γεννήτριας. Η διευθέτηση και η σχεδίαση των τυλιγμάτων της γεννήτριας, οι μέθοδοι γείωσης, το σύστημα διέγερσης και οι τρόποι εγκατάστασης στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν κρίσιμα ζητήματα κατά την προστασία μιας γεννήτριας. Ένας γενικός κανόνας που οφείλει να ακολουθηθεί, είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μηχανή, τόσο μεγαλύτερο αριθμό συστημάτων προστασίας πρέπει να διαθέτει. Ο κανόνας αυτός στοχεύει στο να ελαχιστοποιήσει το κόστος επισκευής της γεννήτριας, αλλά και την οικονομική ζημία που θα προκαλέσει πιθανή βλάβη σε κάποια μονάδα του συστήματος. Είναι σημαντικό η γεννήτρια να χρησιμοποιείται σωστά, διότι σε περίπτωση που εμφανιστεί υπέρταση ή χαμηλή συχνότητα ή και τα δύο ταυτόχρονα για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, μπορεί να προκληθεί πολύ μεγάλη ροή στο μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας με αποτέλεσμα την υπερθέρμανσή της και την πρόκληση σοβαρών βλαβών σε αυτή. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται τα στοιχεία Volts/Hertz με ρύθμιση σταθερού ή αντίστροφου χρόνου ή συνδυασμού και των δύο. Γενικότερα, κάθε γεννήτρια οφείλει να διαθέτει βασική προστασία έναντι των βραχυκυκλωμάτων του στάτη και προστασίες έναντι διαφορετικών τύπων σφαλμάτων. Επίσης, σε περιπτώσεις αποτυχίας ή μη διαθεσιμότητας της κύριας προστασίας, θα πρέπει να παρέχονται τρόποι, ώστε να εξασφαλίζεται απομόνωση του σφάλματος. Έτσι, είναι απαραίτητες και εφεδρικές μέθοδοι προστασίας, διαφορετικών τύπων, κατάλληλων για διαφορετικές εφαρμογές.

Η χρησιμότητα της εργασίας εκφράζεται από το γεγονός ότι αποτελεί μια δευτερογενή μελέτη της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν μια σαφή εικόνα σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών. Υπό την έννοια αυτή, είναι εξαιρετικά χρήσιμα, καθώς μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντικές έρευνες με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας, της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Βιβλιογραφία

- [1] ABBSACE, "Photovoltaic plants", Technical Application Papers No.10, 2010, [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/d54672ac6e97a439c12577ce003d8d84/\\$FILE/Vol.10.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/d54672ac6e97a439c12577ce003d8d84/$FILE/Vol.10.pdf) (Ανάκτηση την 10/12/2015).
- [2] A. B. Dehkordi and A. M. Gole, T. L. Maguire, "Permanent Magnet Synchronous Machine Model for Real-Time Simulation", International Conference on Power Systems Transients (IPST), Montreal, Canada, 19-23 June, 2005.
- [3] AIMU Technical Services Committee, "Wind Turbine Paper", January 2012. <https://www.aimu.org/aimupapers/AIMUWindTurbinefinal7.24.pdf> (Ανάκτηση την 10/12/2015).
- [4] C.F. Kutscher, "The Status and Future of Geothermal Electric Power", National Renewable Energy Laboratory, American Solar Energy Society (ASES) Conference, Madison, Wisconsin, 16-21 June, 2000.
- [5] C. Loo, E. Liceaga-Castro, L. Vanfretti, E. Acha, "Synchronous Generators Modeling and Control Using the Framework of Individual Channel Analysis and Design: Part 1", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol.8, No. 5, November 2007.
- [6] E. Muljadi and C.P. Butterfield, "Investigation of Self-Excited Induction Generators for Wind Turbine Applications", IEEE Industry Applications Conference, 34th IAS Annual Meeting, Phoenix, Arizona, USA, 3-7 October, 1999.
- [7] EurObserv'ER, "Photovoltaic Barometer". <http://www.eurobserv-er.org/> (Ανάκτηση την 18/12/2015)
- [8] The European Wind Energy Association (EWEA), "Wind in power", 2013 European statistics, February 2014. http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA_Annual_Statistics_2013.pdf (Ανάκτηση την 11/11/2015)
- [9] GEDH (2014). "Geothermal District Heating has the potential to alleviate Europe's energy security crisis", May 2014. <http://geodh.eu/wp-content/uploads/2014/05/PR-Geothermal-District-Heating-has-the-potential-to-alleviate-Europe%E2%80%99s-energy-security-crisis.pdf> (Ανάκτηση την 12/2/2015)
- [10] Electric Power Research Institute (EPRI), "DC Power Production, Delivery and Utilization". White Paper, June 2006.

http://www.netpower.se/documents/EPRI_DCpower_WhitePaper_June_2006.pdf
(Ανάκτηση την 14/11/2015)

- [11] International Electrotechnical Commission (IEC), "Grid Integration of Large-Capacity Renewable Energy Sources and Use of Large-Capacity Electrical Energy Storage", White Paper RE-EES:2012, October 2012 <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-gridintegrationlargecapacity-LR-en.pdf> (Ανάκτηση την 15/12/2015)
- [12] M. T. Ameli, A. Mirzaie and S. Moslehpour, "Feasibility Study for Replacing Asynchronous Generators with Synchronous Generators in Wind Farm Power Stations", International Journal of Modern Engineering, Springer, Vol. 10, No. 2, 2010.
- [13] M. R. Barakat, M. E. Bahgat and A. A. Sayed, "Effect of Rotor Current Control for Wound Rotor Induction Generator on the Wind Turbine Performance" International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol 2, No , pp. 117-126, June 2012.
- [14] M. Rahman, N. Paul, S. Islam, S. Rashed and S. Ahmed, "Power Generation from Sea Wave: An Approach to Create Renewable Energy", Global Journal of Researches in Engineering, General Engineering Vol. 13, No. 1, 2013.
- [15] N. Verma and A. Pachori. "Theoretical Approach for Comparison of Various Types of Wind Generator Systems", International Journal of Recent Research in Electrical and Electronics Engineering (IJRREEE), Vol. 2, No. 2, pp. 29-35, April-June 2015.
- [16] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass", Bioresource Technology, Elsevier, Vol. 83, No. 1, pp. 37-46, May 2002.
- [17] P. Portela, J. Sepulveda and J. Esteves, "Alternating Current and Direct Current Generator", International Journal on Hands-on Science, Vol. 1, No. 1, pp 44-46, September 2008.
- [18] N. Rajkumar, "Direct Current and Alternating Current Systems", Encyclopedia of Life Support Systems, (EOLSS), Electrical Engineering, Vol. 1, <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-39a-01-03.pdf> (Ανάκτηση την 20/11/2015).
- [19] R. Pena, J.C. Clare and G. M. Asher, "Doubly Fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters and its Application to Variable Speed Wind-Energy Generation", IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol.143, No3, pp 231-241, May 1996.
- [20] S. R. Ahameed, "Design of Simple Recycling AC Electrical Energy Generation System with Small DC Input and High Efficiency with Good Load Handling Capability", International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), Vol. 3, No 2, pp 419-423, February 2014.

- [21] R. Rudervall, J.P. Charpentier, and R. Sharma, "High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology", Energy Week 2000, Washington, D.C, USA, 7-8 March, 2000.
- [22] R.W. Erickson, "Modeling and Control of Power Electronics Systems", Department of Electrical, Computer, and Energy Engineering, University of Colorado, Boulder, April 2015, http://ecee.colorado.edu/~ecen5807/course_material/Lecture41.pdf (Ανάκτηση την 19/12/2015).
- [23] S.P. Gawande, K.B. Porate, K.L.Thakre and G.L.Bodhe, "Synchronization of Synchronous Generator and Induction Generator for Voltage & Frequency Stability Using STATCOM", 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET),Goa, India, 19-21 November 2010.
- [24] T. Ali,M.O. Faruk, and S.D. Gupata, "Tidal Power: An Option for Alternative Sustainable Power Generation in Bangladesh". International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 2, No. 10, October 2012.
- [25] T. B. Cochran, C. E. Paine, G. Fettus, R. S. Norris and M. G. McKinzie, "Commercial nuclear power", Natural Resources Defense Council (NRDC), October 2005. <https://www.nrdc.org/nuclear/power/power.pdf> (Ανάκτηση την 9/11/2015).
- [26] S. M. Masutani and P. K. Takahashi. "Ocean thermal energy conversion (OTEC)", University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI, USA, 2001, Academic Press, http://www.curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter2/Ency_Oceans/OTEC.pdf , (Ανάκτηση την 18/11/2015)
- [27] Y.K. Choi "A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact", International Journal of Software Engineering and Its Applications, Vol 8, No 1, pp. 75-84, 2014.
- [28] Z.Maljkovic and I Gasparac, "Operating limits of underexcited synchronous generator", 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Instabul, Turkey, 13-17 May 2013.
- [29] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Ανανέωσιμες Πηγές Ενέργειας, <http://www.ypeka.gr/?tabid=285>(Ανάκτηση την 12/11/2015).
- [30] C.Reitsma, "An introduction to Inverters and Applications", Calvin College, Michigan USA, <https://www.calvin.edu/.../clint-inverter%20paper.doc> (Ανάκτηση την 20/12/2015).
- [31] N. A. Βοβός, "Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Εκδόσεις Ζήτη, 2009.