



ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

2011

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ
ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΜΟΝΤΕΡΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΤΩΝ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
Κ^{ΟΣ} ΠΕΤΡΟΣ
ΚΑΡΑΙΣΑΣ

ΣΤΟΥΔΑΣΤΕΣ:
ΚΕΦΑΛΛΩΝΙΤΗΣ
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
ΑΜ:35111, ΕΞ:12
ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΠΟΥΛΟΣ
ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΑΜ:33845, ΕΞ:13

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι σχεδίαση ελεγκτών τάσης και συχνότητας σύγχρονων γεννητριών χρησιμοποιώντας μοντέρνες μεθόδους αυτομάτου έλεγχου. Έγινε εκτενής βιβλιογραφική αναφορά πάνω στους ελεγκτές τάσης και συχνότητας με έμφαση στο Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ), τον Αυτόματο Ρυθμιστή Τάσης (APT) και τον Σταθεροποιητή Συστήματος Ισχύος (Power System Stabilizer). Αναλυτικότερα, αρχικά έγινε αναφορά πάνω στα χαρακτηριστικά των γεννητριών, τα ηλεκτρικά μεγέθη που τις περιγράφουν καθώς και τη βασική αρχή λειτουργίας τους. Στη συνέχεια αναλύθηκε ο όρος ευστάθεια ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, που περιλαμβάνει την ευστάθεια της τάσης, της γωνίας και της συχνότητας. Ο τρόπος που θα αντιδράσει το σύστημα στις διαταραχές καθορίζεται από ελεγκτές οι οποίοι είτε βρίσκονται ενσωματωμένοι στις γεννήτριες είτε είναι ξεχωριστές διατάξεις. Στη συνέχεια περιγράφεται ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης, τα είδη του καθώς και διάφορες συνδεσμολογίες. Επίσης περιγράφεται και η εξέλιξη των ελεγκτών τάσης που είναι οι μη γραμμικοί ελεγκτές. Από την πλευρά του ελέγχου της συχνότητας, αυτός επιτυγχάνεται με το Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης. Μετά την ανάλυση των αρχών λειτουργίας των ΣΠΥ, γίνεται συζήτηση για τις εφαρμογές τέτοιων ελεγκτών σήμερα σε συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Τα πιο ενδιαφέροντα συστήματα είναι τα αιολικά, όπου παρουσιάζονται κάποιες εξελίξεις πάνω στον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας του συστήματος. Τέλος παρουσιάζονται και τα φωτοβολταϊκά συστήματα καθώς και οι τρόποι ελέγχου της τάσης και της συχνότητας κατά τη σύνδεσή τους και κατά την διαταραχή τους. Κύριος στόχος είναι να μελετηθούν οι ελεγκτές τάσης και συχνότητας που λειτουργούν πάνω στις γεννήτριες σήμερα, όπως επίσης και οι προοπτικές για αποδοτικότερους ελεγκτές

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Κεφάλαιο 1 ^ο	5
Σύγχρονες Γεννήτριες.....	5
1.1. Εισαγωγή	5
1.2. Εισαγωγικά για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	5
1.3. Σύγχρονες Γεννήτριες.....	9
1.3.1. Τύποι και κατασκευή εναλλακτών.....	12
1.3.2. Συχνότητα και ταχύτητα περιστροφής.....	15
1.3.3. Τριφασικές γεννήτριες	16
1.3.4. Ρύθμιση τάσης γεννήτριας.....	18
1.3.5. Λειτουργία υπό φορτίο	19
1.3.6. Χαρακτηριστικά στοιχεία γεννητριών.....	20
1.3.7. Απώλειες και βαθμός απόδοσης γεννήτριας.....	22
1.4. Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας	22
Κεφάλαιο 2 ^ο	25
Ευστάθεια Συστήματος	25
2.1. Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	25
2.1.1. Ορισμός Ευστάθειας	25
2.1.2. Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ	27
2.1.3. Ευστάθεια γωνίας	29
2.1.4. Ευστάθεια τάσης	31
2.1.5. Ευστάθεια συχνότητας.....	35
Κεφάλαιο 3 ^ο	37
Ελεγκτές Τάσης.....	37
3.1. Εισαγωγικά για τους Ελεγκτές Τάσης	37
3.2. Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης (APT)	38
3.2.1. Μοντέλο APT με διεγέρτρια Συνεχούς Ρεύματος.....	39
3.2.2. Μοντέλο APT με διεγέρτρια Εναλλασσόμενου Ρεύματος.....	41
3.2.3. Μοντέλο APT με Διεγέρτρια Στατικού Τύπου	43
3.3. Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης.....	45

3.4. Μη Γραμμικοί Ελεγκτές Τάσης.....	47
Κεφάλαιο 4ο.....	48
Ελεγκτές Συχνότητας.....	48
4.1. Εισαγωγικά για τους Ελεγκτές Συχνότητας.....	48
4.2. Σταθεροποιητές Συστήματος Ισχύος.....	48
4.3. Έλεγχος Στροφών Γεννήτριας.....	52
Εφαρμογές ελεγκτών τάσης και συχνότητας σε σύγχρονες γεννήτριες.....	53
5.1. Εφαρμογές σε Αιολικά Συστήματα (Ανεμογεννήτριες)	53
5.1.1. Μέθοδοι ελέγχου ανεμογεννήτριας.....	57
5.2. Εφαρμογές σε Συστήματα Κατανεμημένης Παραγωγής (Φωτοβολταϊκά Συστήματα)	59
5.2.1. Σύνδεση στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης και Μέσης Τάσης	59
5.2.2. Έλεγχος κατά το φαινόμενο της νησιδοποίησης	62
Συμπεράσματα	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Σύγχρονες Γεννήτριες

1.1. Εισαγωγή

Η γενικευμένη χρήση της Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι πλέον ανάγκη του σύγχρονου πολιτισμού και αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους για την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μιας χώρας. Ηλεκτρική είναι εκείνη η μορφή ενέργειας η οποία συσχετίζεται με την κίνηση των διαφόρων ηλεκτρικών φορτίων. Βασικό μειονέκτημα της είναι το γεγονός ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί. Για αυτό το λόγο πρέπει να καταναλώνεται τη στιγμή που παράγεται και το αντίστροφο.

Η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας στους εκάστοτε καταναλωτές επιτυγχάνεται μέσω του *Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας* (ΣΗΕ). Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να μπορεί να παρέχει κάθε χρονική στιγμή την ποσότητα της ενέργειας η οποία ζητείται, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα σταθερή συχνότητα και τάση καθώς επίσης και αξιοπιστία τροφοδότησης. Επιπλέον, όλα αυτά θα πρέπει να τα επιτυγχάνει με το μικρότερο δυνατό οικονομικό κόστος ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις όποιες δυσμενείς για το περιβάλλον επιπτώσεις.[1]

1.2. Εισαγωγικά για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το βασικό σύστημα ΣΗΕ αποτελείται από τα εξής τμήματα: το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής. Προκειμένου να διατεθεί στους καταναλωτές ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει καταρχήν να παραχθεί σε σταθμούς παραγωγής. Οι πάσης φύσεως σταθμοί παραγωγής είναι εν γένει μακριά από τις τοποθεσίες των μεγάλων καταναλώσεων για λόγους οικολογικούς αλλά και αισθητικούς. Οι σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν διάφορα καύσιμα τα οποία προσδίδουν με την καύση τους κινητική ενέργεια σε στροβίλους οι οποίοι με τη σειρά τους είναι συνδεδεμένοι σε κοινό άξονα με τον άξονα ηλεκτρικών γεννητριών οι οποίες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια των στροβίλων σε

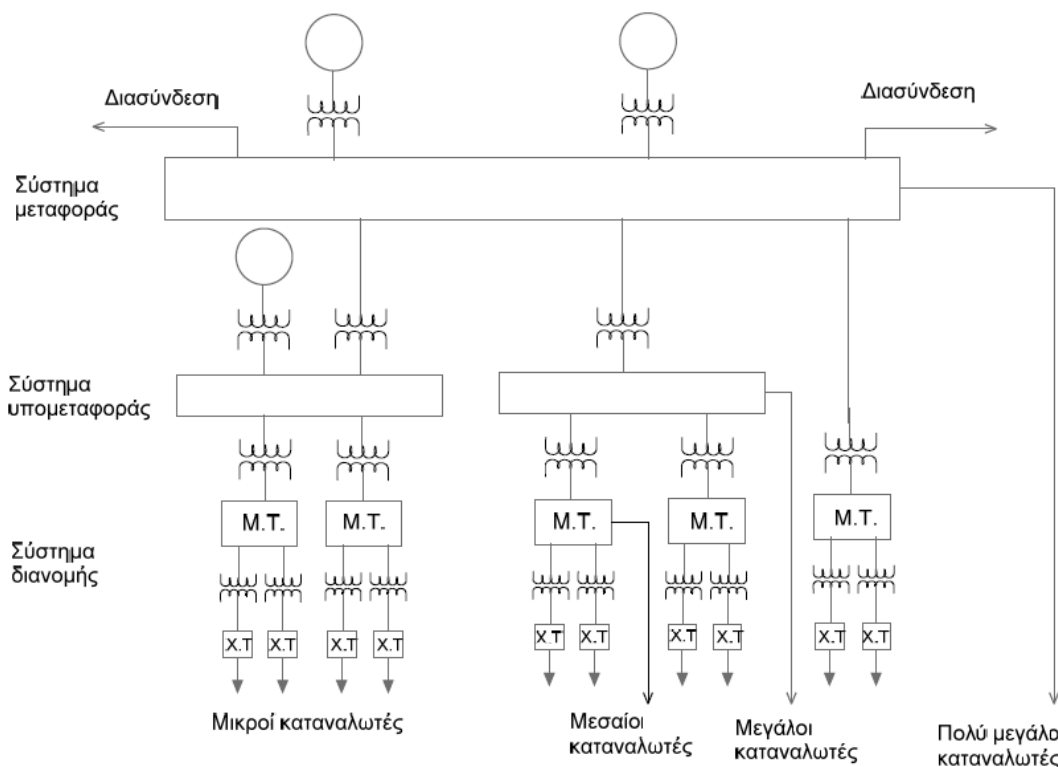
ηλεκτρική ενέργεια. Οι ηλεκτρικές γεννήτριες επάγουν ηλεκτρική τάση η οποία εν γένει διαφέρει από γεννήτρια σε γεννήτρια ανάλογα ιδίως με την ονομαστική της ισχύ. Για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας όμως χρειάζεται να υπάρχει ένα ενιαίο επίπεδο τάσης προκειμένου να είναι εφικτή η λειτουργία του όλου συστήματος. Για το λόγο αυτό το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζεται σε υποσυστήματα τα οποία έχουν κοινό επίπεδο τάσης. Αρχικά από τους σταθμούς παραγωγής με τη βοήθεια μετασχηματιστών ανυψώσεως η τάση ανυψώνεται σε επίπεδα και δηλαδή στα λεγόμενα επίπεδα υψηλής και υπερύψηλης τάσεως. Ο σκοπός που ανυψώνεται η τάση σε μεγάλα επίπεδα σχετίζεται με τις αυξημένες δυνατότητες μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος αλλά και τον περιορισμό των απωλειών ισχύος κατά τη μεταφορά της.

Το σύστημα μεταφοράς περιέχει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης με τις οποίες μεταφέρεται η ηλεκτρική ισχύς. Επίσης περιλαμβάνουν τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ διαφόρων επιπέδων τάσης αλλά και τους υποσταθμούς υποβιβασμού σε μέση τάση για την τροφοδότηση των δικτύων διανομής. Το σύστημα μεταφοράς έχει βροχοειδή δομή για να υπάρχουν διαφορετικές εν δυνάμει διαδρομές που να μπορεί να ακολουθήσει η ηλεκτρική ισχύς καθώς μεταφέρεται από την παραγωγή προς τα φορτία. Οι εναλλακτικοί δρόμοι μεταφοράς της ισχύος υπάρχουν και για λόγους αξιοπιστίας σε περίπτωση απώλειας κυκλώματος προκειμένου να συνεχίζει να υπάρχει δυνατός τρόπος τροφοδότησης της ηλεκτρικής ενέργειας προς τα φορτία.

Τα δίκτυα υπομεταφοράς μεταφέρουν ενέργεια σε μικρότερες ποσότητες σε σχέση με τα αντίστοιχα μεταφοράς, καθώς η τάση λειτουργίας τους είναι μικρότερη αυτής των μεταφοράς, δηλαδή από 22kV έως 150kV. Μεταφέρουν ενέργεια προς μικρότερα κέντρα κατανάλωσης στην ίδια περιοχή μείζονος φορτίου. Εν γένει ο ρόλος του συστήματος υπομεταφοράς είναι παρόμοιος με αυτόν του δικτύου διανομής, με τη διαφορά ότι τροφοδοτεί ισχυρότερους καταναλωτές και επομένως η παροχή γίνεται υπό υψηλότερη τάση από αυτήν των διανομής. Η χρησιμότητά τους όμως σήμερα τείνει ολοένα να μειώνεται καθώς τα δίκτυα υπομεταφοράς ήταν τα παλιά δίκτυα μεταφοράς. Σήμερα δεν υπάρχει λόγος να υπάρχει διαφορετικό επίπεδο τάσης για τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλους καταναλωτές και επομένως τα δίκτυα υπομεταφοράς περιορίζονται ολοένα και περισσότερο.

Τα δίκτυα διανομής συνδέονται με τη μεταφορά μέσω των υποσταθμών υποβιβασμού της τάσης από υψηλή σε μέση. Τα δίκτυα διανομής πρέπει να φτάνουν μέχρι και τον τελευταίο καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας. Η διανομή διακρίνεται σε πρωτεύουσα και σε δευτερεύουσα. Η πρωτεύουσα διανομή γίνεται σε επίπεδα μέσης τάσης (20-22kV) και η δευτερεύουσα σε χαμηλή τάση 400V. Τα δίκτυα διανομής είναι πολύ πιο πυκνά από τα αντίστοιχα δίκτυα μεταφοράς και για το λόγο αυτό στις μελέτες συστημάτων μεταφοράς τα δίκτυα διανομής αναπαρίστανται ως ισοδύναμοι ζυγοί φορτίου, διότι αναλυτικότερη αναπαράσταση δεν θα είχε σημαντική διαφορά στις προσομοιώσεις και θα αύξανε δραματικά το υπολογιστικό κόστος υλοποίησης της προσομοίωσης. Το ισοδύναμο αυτό

φορτίο του κάθε Υποσταθμού Υψηλής Τάσης/Μέσης Τάσης αντιπροσωπεύει το δίκτυο διανομής με όλα τα φορτία του και για το λόγο αυτό παριστάνεται με τρόπο που να αντιπροσωπεύει όσο γίνεται πιο πιστά τη διανομή. Αντίστοιχα σε μελέτες δικτύων διανομής η αναλυτική παράσταση του δικτύου μεταφοράς δεν θα είχε κάποια σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό η μεταφορά μοντελοποιείται ως μία πηγή τάσης στο πρωτεύον τριφασικό τύλιγμα του αντίστοιχου μετασχηματιστή του ΥΣ διανομής από τον οποίο τροφοδοτείται το εκάστοτε δίκτυο διανομής προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα των προγραμμάτων προσομοίωσης σε Η/Τ.



Σχήμα 1.1: Βασική δομή ενός ΣΗΕ[12]

Η δυσκολία αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας δημιούργησε την ανάγκη για την κατασκευή εκτεταμένων δικτύων μεταφοράς και διανομής, τα οποία εξασφαλίζουν την άμεση παροχή του ενεργειακού αγαθού στον τελικό καταναλωτή.

Η διαρκής αύξηση των ενεργειακών αναγκών και η συνακόλουθη αύξηση των ηλεκτρικών φορτίων έχουν σαν αποτέλεσμα την απαίτηση όλο και μεγαλύτερης μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος μέσω των ηλεκτρικών δικτύων. Ωστόσο, η επέκταση των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να καλυφθούν οι αυξανόμενες ανάγκες των κέντρων κατανάλωσης, καθίσταται ολοένα και δυσκολότερη τα τελευταία χρόνια είτε λόγω περιβαλλοντικών, είτε λόγω οικονομικών περιορισμών. Επίσης, η κατασκευή, η συνέχιση της λειτουργίας ή η επαναλειτουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κοντά σε

αστικά κέντρα (όπου βρίσκεται συγκεντρωμένο το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρικών φορτίων), συναντά επίσης πολλές και ενδεχομένως δικαιολογημένες αντιδράσεις. Επομένως, η διαρκής αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στα αστικά και βιομηχανικά κέντρα, επιβάλλει την εντατικότερη χρήση των διαθέσιμων δικτύων μεταφοράς, με αποτέλεσμα τη λειτουργία του συστήματος ολοένα και πιο κοντά στο όριο της ικανότητας μεταφοράς [3].

Οι ιδιαίτερα έντονες συνθήκες φόρτισης οδήγησαν ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 στην εμφάνιση νέου τύπου φαινομένων αστάθειας σε πολλά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) σε διάφορα σημεία του πλανήτη. Τα βασικά χαρακτηριστικά των καινούριων φαινομένων είναι η αργή ή απότομη βύθιση της τάσης. Τα φαινόμενα εντοπίζονται συνήθως σε μία περιοχή του δικτύου, αλλά μπορεί να επεκταθούν σταδιακά και στο υπόλοιπο δίκτυο. Τα φαινόμενα αυτά αστάθειας χαρακτηρίζονται με το γενικό όρο αστάθεια τάσης. Σημειώνεται ότι τα φαινόμενα αστάθειας τάσης εμφανίστηκαν ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 σε όλες σχεδόν τις ανεπτυγμένες χώρες (π.χ. Γαλλία, Ηνωμένο Βασίλειο, Σουηδία, Καναδάς, Η.Π.Α., Ιαπωνία), ακριβώς γιατί στις χώρες αυτές η αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συνδυάζεται με την έντονη περιβαλλοντική ευαισθησία [4]. Στην Ελλάδα, παρόμοια περιστατικά αστάθειας τάσης καταγράφηκαν σε συνθήκες αιχμής τον Ιούλιο του 1996 [5] και τον ίδιο μήνα του 2004 [6], οδηγώντας σε διαχωρισμό του συστήματος, με αποτέλεσμα την ολική σβέση στο νότιο τμήμα.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι, εκτός από τα φορτία, στην αστάθεια τάσης συνεισφέρουν και διάφορες άλλες διατάξεις των ΣΗΕ, όπως τα συστήματα ελέγχου και προστασίας των σύγχρονων γεννητριών, οι διασυνδετικές γραμμές συνεχούς ρεύματος με ρύθμιση ισχύος κτλ.

Τα τελευταία χρόνια, η απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και η αλλαγή της σύνθεσης των ηλεκτρικών φορτίων έχουν προσδώσει νέο ενδιαφέρον στις μελέτες ευστάθειας των ΣΗΕ. Ειδικότερα, η απελευθέρωση των ενεργειακών αγορών καταργεί το σύστημα παραγωγής-μεταφοράς-διανομής και επομένως παρέχει τη δυνατότητα στους υποψήφιους ανεξάρτητους παραγωγούς να επενδύσουν σε περιοχές της επιλογής τους ανάλογα με τα συμφέροντά τους. Παράλληλα, η ολοένα αυξανόμενη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας οδηγεί στη σύνδεση όλο και περισσότερων διεσπαρμένων γεννητριών στο δίκτυο, με αποτέλεσμα τη μείωση της ηλεκτρικής απόστασης μεταξύ των παραγωγών και των καταναλωτών και τη μεταβολή της ροής ισχύος στο εσωτερικό του συνδυασμένου συστήματος μεταφοράς-διανομής.

Από την άλλη πλευρά, η χαρακτηριστική των σύγχρονων φορτίων καθιστά ολοένα και πιο ευάλωτα τα δίκτυα στις μεταβολές της τάσης, λόγω α) της αυξανόμενης διείσδυσης μηχανών επαγωγής (είτε ως κινητήρες σε οικιακούς και βιομηχανικούς καταναλωτές είτε ως γεννήτριες σε αιολικά πάρκα), β) της διείσδυσης φορτίων ανεξάρτητων της τάσης που ελέγχονται από κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος, γ) της εκτεταμένης χρήσης συστημάτων

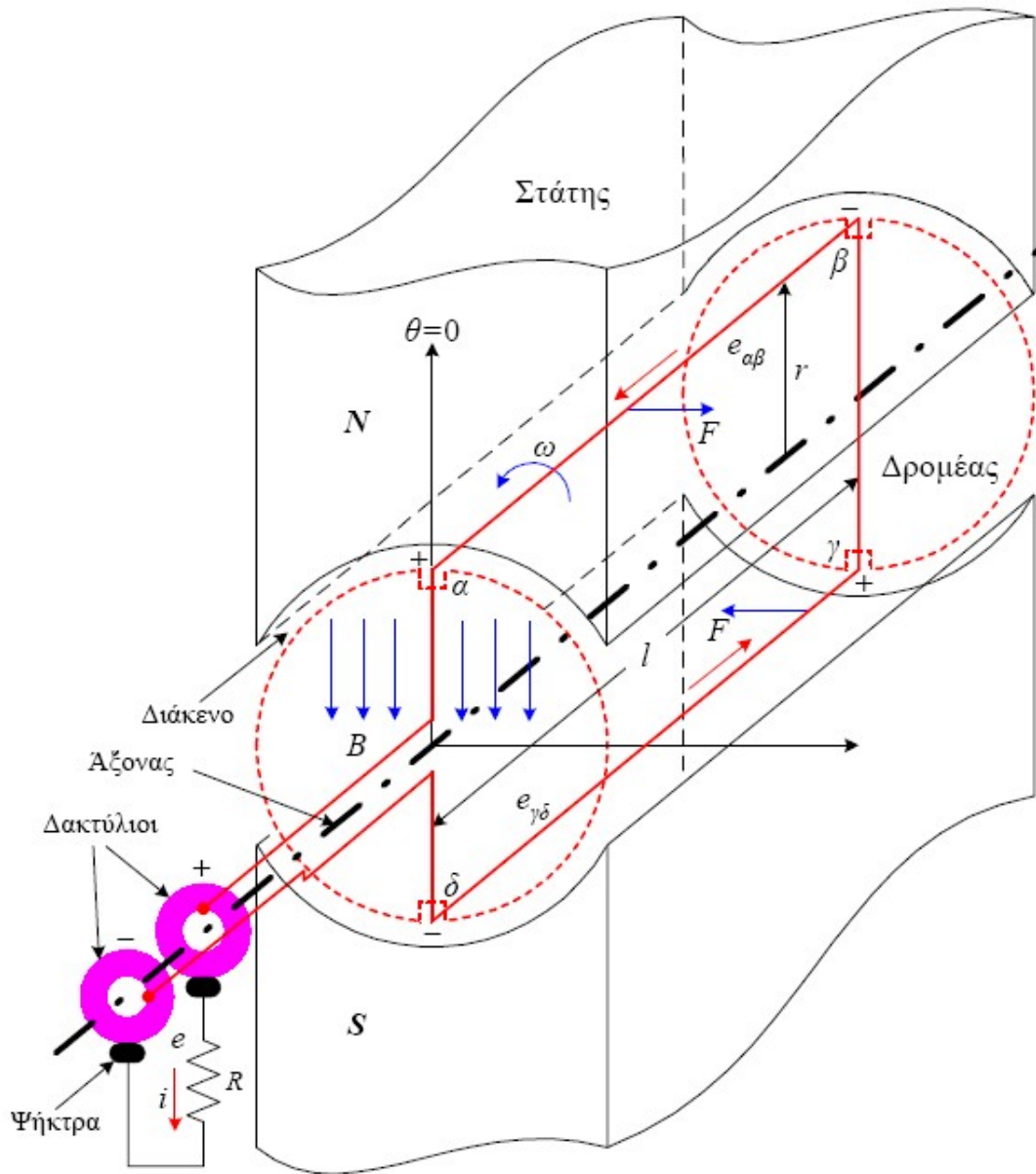
πυκνωτών για αντιστάθμιση άεργου ισχύος, καθώς επίσης και δ) της αυξημένης χρήσης γραμμών Συνεχούς Ρεύματος (ΣΡ) στο επίπεδο της Υψηλής Τάσης (ΥΤ).[13]

1.3. Σύγχρονες Γεννήτριες

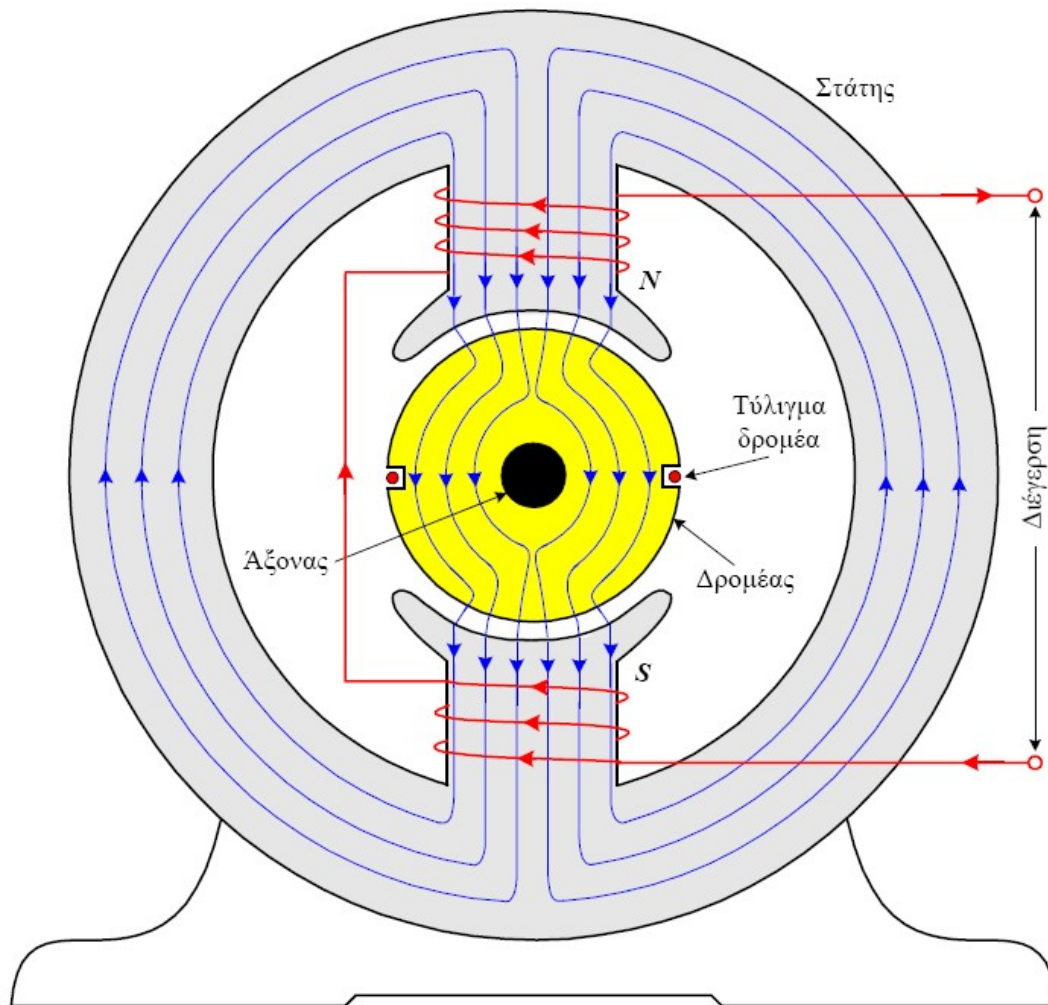
Ηλεκτρική μηχανή είναι ένας μετατροπέας ενέργειας, δηλαδή είναι η συσκευή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Μια τέτοια συσκευή, όταν χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μηχανικής ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια. Όταν η συσκευή μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζεται κινητήρας.

Ηλεκτρική μηχανή είναι ένας μετατροπέας ενέργειας, δηλαδή είναι η συσκευή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Μια τέτοια συσκευή, όταν χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μηχανικής ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια. Όταν η συσκευή μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζεται κινητήρας. [10]

Κάθε ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από δύο κύρια τμήματα. Τα ακίνητο τμήμα της μηχανής ονομάζεται στάτης (stator) και το στρεφόμενο τμήμα δρομέας (rotor). Στο Σχήμα 1.2 εικονίζεται η δομή μιας στοιχειώδους ηλεκτρικής μηχανής. Η αρχή λειτουργίας όλων των ηλεκτρικών μηχανών στηρίζεται σ' αυτή τη στοιχειώδη μηχανή. Ο στάτης της μηχανής αποτελείται από ένα ηλεκτρομαγνήτη με δύο πόλους, το βόρειο και το νότιο, ο οποίος παράγει το μαγνητικό πεδίο B. Ο δρομέας αποτελείται από ένα κύλινδρο κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό, ο οποίος μπορεί να στραφεί γύρω από τον άξονα. Σε δύο αυλακώσεις στην επιφάνεια του κυλίνδρου, είναι συμμετρικά τοποθετημένοι οι αγωγοί ενός πλαισίου. Το πλαίσιο αυτό ονομάζεται, τύλιγμα του δρομέα. Τα άκρα του τυλίγματος του δρομέα συνδέονται σε δύο δακτυλίους, με τους οποίους εφάπτονται οι ψήκτρες (brushes). Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών το τύλιγμα του δρομέα είναι διαθέσιμο στο στάτη. Μεταξύ των πόλων του στάτη και του κυλινδρικού δρομέα, υπάρχει ένα διάκενο αέρα με σταθερό πλάτος. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του στάτη, στη διαδρομή τους από το βόρειο προς το νότιο πόλο, διέρχονται μέσω του δρομέα και του διακένου. Επειδή η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του δρομέα, οι δυναμικές γραμμές είναι κάθετες στην επιφάνεια του δρομέα (Σχήμα 1.3). Έτσι, η διαδρομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο με τη μεγάλη μαγνητική αντίσταση είναι ελάχιστη. Επιπλέον, η μαγνητική ροή που διέρχεται από το τύλιγμα του δρομέα μεταβάλλεται περίπου γραμμικά, καθώς ο δρομέας στρέφεται [11].



Σχήμα 1.2: Δομή μιας στοιχειώδους ηλεκτρικής μηχανής [11]



Σχήμα 1.3: Εγκάρσια τομή στη στοιχειώδη ηλεκτρική μηχανή. Δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, όπου διακρίνεται ο στάτης. Οι μαγνητικές γραμμές είναι κάθετες στην επιφάνεια του δρομέα [11]

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι δύο ειδών:

- οι σύγχρονες γεννήτριες ή εναλλακτήρες και
- οι ασύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα με συχνότητα ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής ενώ η διέγερσή τους τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Οι ασύγχρονες γεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα του οποίου η συχνότητα είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής και η διέγερσή τους τροφοδοτείται με

εναλλασσόμενο ρεύμα. Στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται πάντοτε σύγχρονες γεννήτριες ενώ οι ασύγχρονες χρησιμοποιούνται σπάνια. Στην συνέχεια θα εξετασθούν μόνο οι σύγχρονες γεννήτριες ή εναλλακτήρες.

1.3.1. Τύποι και κατασκευή εναλλακτών

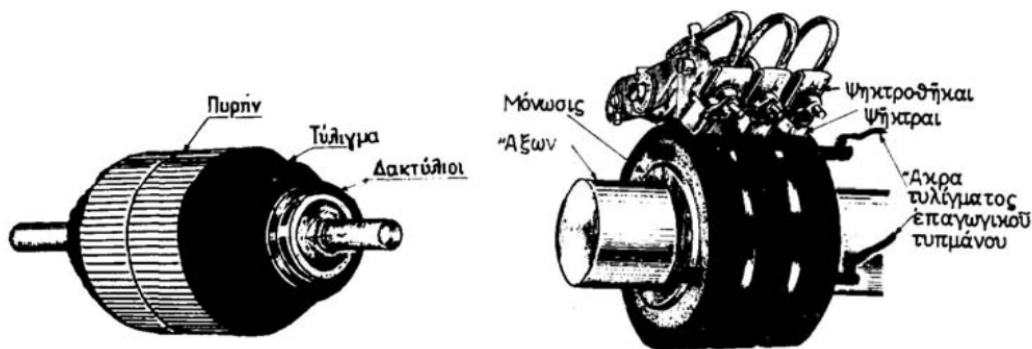
Από κατασκευαστική άποψη οι εναλλακτήρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες

- γεννήτριες με εξωτερικούς πόλους
- γεννήτριες με εσωτερικούς ή περιστρεφόμενους πόλους (στροβιλογεννήτριες)

➤ Γεννήτριες με εξωτερικούς πόλους

Σε αυτές η διέγερση της μηχανής γίνεται από μαγνητικούς πόλους στερεωμένους στο εσωτερικό του ζυγώματος του στάτη, όπως και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Τα τυλίγματα των πόλων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από πηγή συνεχούς ρεύματος είτε γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ή ανορθωτική διάταξη. Ο δρομέας φέρει το επαγωγικό τύμπανο όπως και η μηχανή συνεχούς ρεύματος και το τύλιγμά του τοποθετείται στα αυλάκια του πυρήνα. Αντί συλλέκτη υπάρχουν δακτύλιοι κατασκευασμένοι από ορείχαλκο στερεωμένοι στον άξονα του δρομέα σε αριθμό ίσο με των αριθμό των φάσεων του εναλλακτήρα που συνδέονται με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Στους δακτυλίους εφάπτονται ψήκτρες σταθερά συνδεδεμένες στο ακίνητο τμήμα της μηχανής που οδηγούν το παραγόμενο ρεύμα έξω από την μηχανή.

Βασικά μειονεκτήματα της κατασκευής είναι ότι ολόκληρο το ρεύμα φορτίου πρέπει να περνά από τις ψήκτρες και η ισχυρή καταπόνηση των τυλιγμάτων λόγω περιστροφής τους σε πολύστροφους γεννήτριες. Για τους παραπάνω δύο λόγους αυτός ο τύπος γεννήτριας κατασκευάζεται μόνο για μικρές ισχύς και χαμηλή τάση.

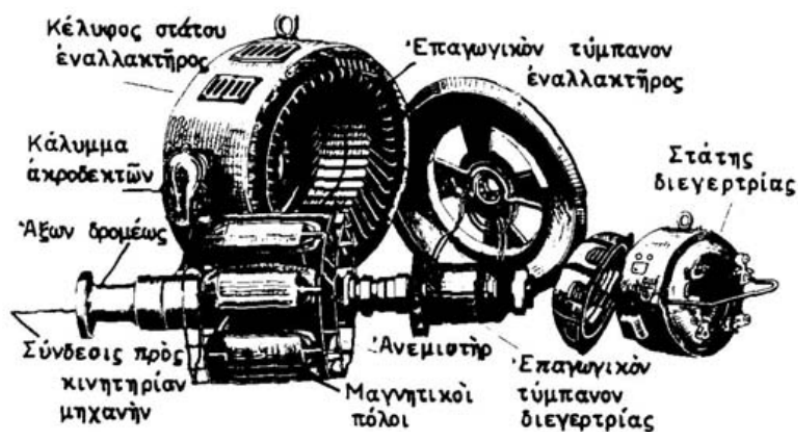


Σχήμα 1.4 Δρομέας και δακτύλιοι γεννήτριας με εξωτερικούς πόλους

➤ Γεννήτριες με εσωτερικούς πόλους

Στις γεννήτριες αυτές το επαγωγικό τύμπανο είναι τοποθετημένο στο ακίνητο μέρος της μηχανής, τον στάτη. Οι μαγνητικοί πόλοι τοποθετούνται ακτινικά στον άξονα του περιστρεφόμενου δρομέα και για τον λόγο αυτό ονομάζονται και γεννήτριες με περιστρεφόμενους πόλους.

Στο Σχήμα 1.5 φαίνεται ένας



αποσυναρμολογημένος εναλλακτήρας με εσωτερικούς πόλους Η διεγέρτρια μηχανή κινείται από τον άξονα της γεννήτριας.

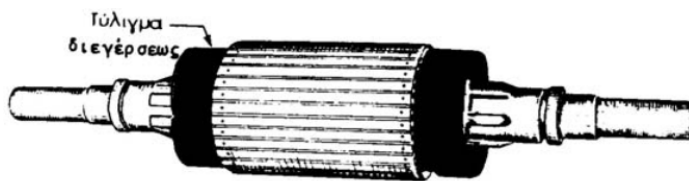
Σχήμα 1.5 Αποσυναρμολογημένη γεννήτρια με περιστρεφόμενους πόλους.

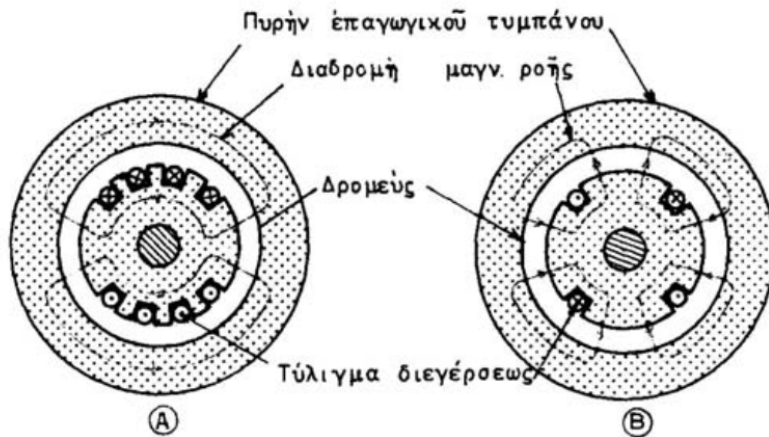
Ο στάτης αποτελείται από εξωτερικό κέλυφος κατασκευασμένο από χαλύβδινα ελάσματα μέσα στο οποίο τοποθετείται το επαγωγικό τύμπανο που αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από πολλούς δίσκους ελασμάτων με κατάλληλο σχήμα ώστε να σχηματίζουν τα αυλάκια (όταν τοποθετούνται παράλληλα) μέσα στα οποία τοποθετείται το τύλιγμα, τα άκρα του οποίου καταλήγουν απευθείας στους ακροδέκτες χωρίς την παρεμβολή ψηκτρών και δακτυλίων. Ο δρομέας των γεννητριών με εσωτερικούς

πόλους φέρει τους μαγνητικούς πόλους στερεωμένους ακτινικά. Στις τριφασικές γεννήτριες των σταθμών παραγωγής οι πυρήνες και τα πέδιλα των πόλων κατασκευάζονται από συμπαγή μαλακό χάλυβα. Το διάκενο με πάχος μερικά mm επιτρέπει την ελεύθερη περιστροφή του δρομέα μέσα στον στάτη. Τα τυλίγματα των πόλων τοποθετούνται στους πυρήνες πριν μπουν τα πέδιλα και συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε να δημιουργούνται διαδοχικά μαγνητικοί πόλοι με αντίθετη πολικότητα. Τα τυλίγματα των πόλων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από την διεγέρτρια μηχανή (γεννήτρια συνεχούς ρεύματος) μέσω ψηκτρών και δύο δακτυλίων στερεωμένων στον άξονα του δρομέα. Το ρεύμα αυτό και η τάση του είναι πολύ μικρά σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη του επαγωγικού τυμπάνου και επομένως η κατασκευή δεν καταπονείται ιδιαίτερα. Η όλη διάταξη είναι κατάλληλη για μηχανές με μικρή σχετικά ταχύτητα περιστροφής και χρησιμοποιούνται σε συστήματα παραγωγής με κινητήρια μηχανή είτε υδροστρόβιλο ή μεγάλη μηχανή εσωτερικής καύσης.

➤ Στροβιλογεννήτριες

Ανήκουν στην κατηγορία των μηχανών με εσωτερικούς πόλους αλλά κατασκευάζονται να λειτουργούν με κινητήριες μηχανές μεγάλης ταχύτητας περιστροφής όπως οι ατμοστρόβιλοι. Έτσι βασικό χαρακτηριστικό είναι η μικρή διάμετρος αλλά και το μεγάλο μήκος άξονα. Ο στάτης έχει την ίδια κατασκευή αλλά ο δρομέας δεν έχει εμφανείς πόλους και αποτελείται από συμπαγές κυλινδρικό τύμπανο με αυλάκια μέσα στα οποία μπαίνει και στερεώνεται το τύλιγμα διέγερσης με δύο συνήθως πόλους που καταλήγει σε δύο δακτυλίους στερεωμένους στον δρομέα που εφάπτονται σε δύο ψήκτρες στερεωμένες στον στάτη. Ο δρομέας και το μαγνητικό πεδίο φαίνονται στο Σχήμα 1.6.





Σχήμα 1.6 Δρομέας και μαγνητικό πεδίο στροβιλογεννήτριας

1.3.2. Συχνότητα και ταχύτητα περιστροφής

Η συχνότητα f της παραγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης αποδεικνύεται ότι είναι

$$f = pn \text{ (Hz)}$$

όπου p ο αριθμός των ζευγών των μαγνητικών πόλων

n ο αριθμός στροφών του εναλλακτήρα ανά sec

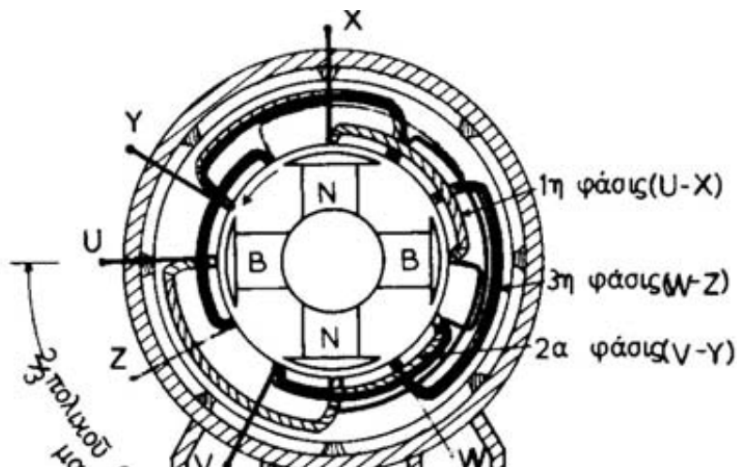
Ο παραπάνω τύπος δίνει την σύγχρονη ταχύτητα ενός εναλλακτήρα όταν αποδίδεται μια ορισμένη συχνότητα. Έτσι

$$n = f/p \text{ (στρ/sec)} \text{ ή } n = 60f/p \text{ (στρ/min)}$$

Στην Ελλάδα και την Ευρώπη είναι $f = 50 \text{ Hz}$ οπότε ανάλογα με τον αριθμό ζευγών πόλων μπορεί να προκύψει και η απαραίτητη ταχύτητα περιστροφής της κινητήριας μηχανής πχ για $p = 1$ η ταχύτητα είναι 3000 στρ/min .

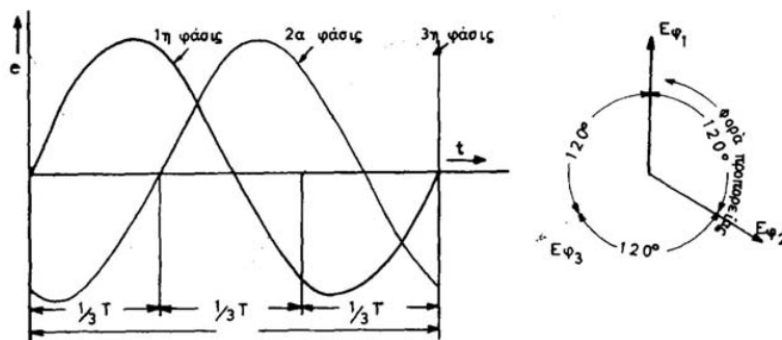
1.3.3. Τριφασικές γεννήτριες

Οι τριφασικοί γεννήτριες φέρουν στο επαγωγικό τύμπανο τρία όμοια και ανεξάρτητα μεταξύ τους μονοφασικά τυλίγματα, τις τρεις φάσεις. Στο Σχήμα 1.7 φαίνεται ένας απλός τριφασικός εναλλακτήρας και το ανάπτυγμα του επαγωγικού τυμπάνου.



Σχήμα 1.7 Τριφασικός εναλλακτήρας με ανάπτυγμα τυλίγματος τυμπάνου

Στα τριφασικά τυλίγματα υπάρχουν 6 άκρα, τρεις αρχές U, V, W και τρία πέρατα X, Y, Z. Έτσι το τύλιγμα U-X αποτελεί την πρώτη φάση, το τύλιγμα V-Y την δεύτερη και το W-Z την τρίτη. Οι εναλλασσόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στις τρεις φάσεις έχουν το ίδιο μέγεθος (ενεργές τιμές), την ίδια συχνότητα και λέγονται φασικές ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις. Οι φασικές ΗΕΔ έχουν μεταξύ τους φασική μετατόπιση 120 μοιρών. Στο Σχήμα 1.8 φαίνονται οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις τριφασικής γεννήτριας τόσο συναρτήσει του χρόνου όσο και με διανυσματική μορφή.



Σχήμα 1.8: Ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις γεννήτριας

Πρακτικά όμως τα τυλίγματα των τριών φάσεων συνδέονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα το συνδεδεμένο τριφασικό σύστημα.

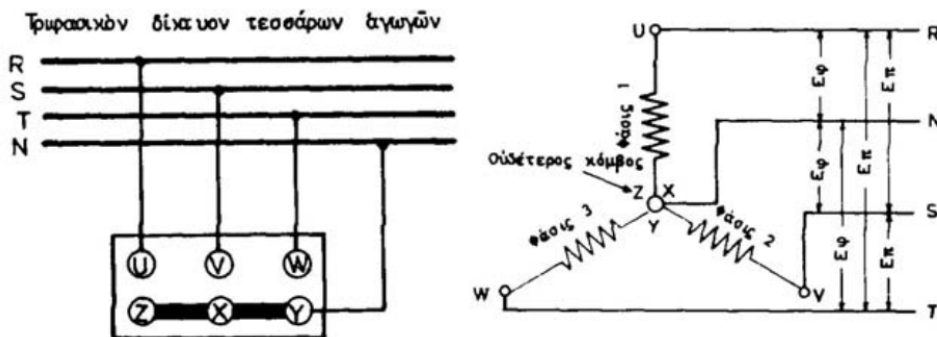
Υπάρχουν δύο τρόποι σύνδεσης μεταξύ των φάσεων, η σύνδεση σε αστέρα και η σύνδεση σε τρίγωνο. Στην σύνδεση σε αστέρα συνδέονται οι ακροδέκτες Z, X, Y που αποτελούν έτσι τον ουδέτερο κόμβο της μηχανής και οι άλλοι τρεις ακροδέκτες U, V, W συνδέονται στο τριφασικό δίκτυο. Όταν το τριφασικό δίκτυο είναι τεσσάρων αγωγών, ο τέταρτος αγωγός συνδέεται στον ουδέτερο κόμβο της μηχανής. Μεταξύ του ακροδέκτη μιας φάσεως και του ουδέτερου υπάρχει η φασική ΗΕΔ του εναλλακτήρα E_{ϕ} και μεταξύ δύο φάσεων υπάρχει η πολική ΗΕΔ E_{π} . Η μεταξύ των δύο σχέση είναι

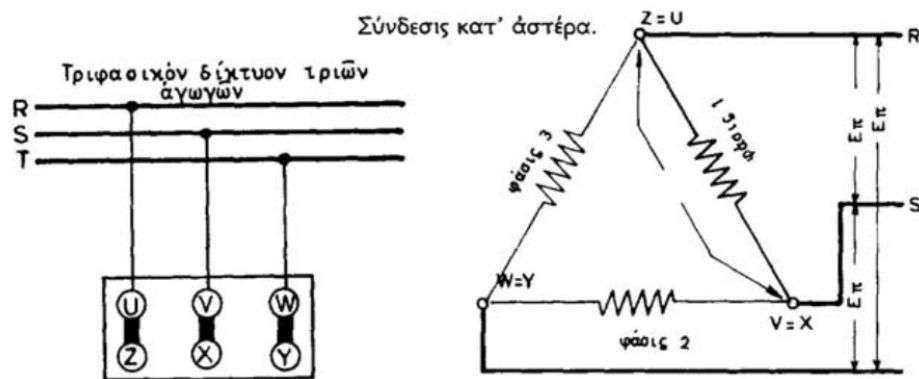
$$E_{\pi} = \sqrt{3}E_{\phi} = 1.73E_{\phi}$$

Η σύνδεση σε τρίγωνο πραγματοποιείται με σύνδεση των ακροδεκτών των φάσεων έτσι ώστε η Z να συνδέεται με την U, η W με την Y και η V με την X. Στην περίπτωση αυτή η φασική ΗΕΔ είναι ίση με την πολική ΗΕΔ, δηλαδή

$$E_{\pi} = E_{\phi}$$

Στο Σχήμα 1.9 φαίνονται οι συνδέσεις σε αστέρα και τρίγωνο.





Σχήμα1.9: Συνδεσμολογία σε αστέρα και σε τρίγωνο

Η ενεργός τιμή της φασικής ΗΕΔ δίνεται από την σχέση

$$E_{\phi} = Kfw\Phi \text{ σε V}$$

Όπου K σταθερά εξαρτώμενη από το τύλιγμα με τιμές μεταξύ 1.9 και 3.4

f η συχνότητα της παραγόμενης τάσης

Φ η μαγνητική ροή ανά πόλο σε Wb

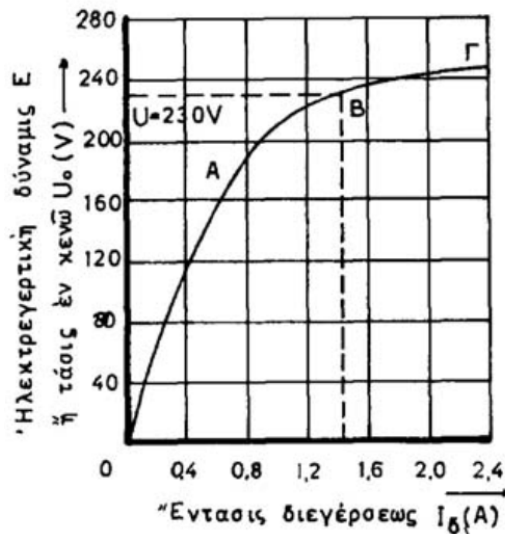
w ο αριθμός των σε σειρά αγωγών του τυλιγματος της φάσης (αριθμός αυλακών επί τον αριθμό των αγωγών ανά αυλάκι)

1.3.4. Ρύθμιση τάσης γεννήτριας

Η μεταβολή της ΗΕΔ της γεννήτριας μπορεί να γίνει είτε με μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής ή της μαγνητικής ροής Φ σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο της ΗΕΔ, των άλλων παραμέτρων να αποκλείονται λόγω του ότι εξαρτώνται από κατασκευαστικά στοιχεία. Η μεταβολή της ταχύτητας πάλι δεν είναι επιτρεπτή αφού έτσι θα αλλάξει η συχνότητα της παραγόμενης τάσης. Επομένως η μόνη πρακτική δυνατότητα μεταβολής

είναι εκείνη της μαγνητικής ροής Φ που εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης. Στις μεγάλες γεννήτριες, λόγω του ότι το ρεύμα διέγερσης έχει σημαντικές τιμές η ρύθμιση της διέγερσης γίνεται όχι με ροοστάτη διεγέρσεως στο τυλίγμα της διεγέρτριας μηχανής αλλά με τροφοδοσία του τυλίγματος της διεγέρτριας από άλλη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (λέγεται διεγέρτρια πιλότος).

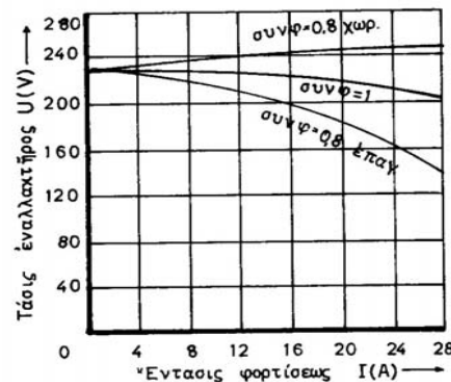
Η καμπύλη μεταβολής της ΗΕΔ της γεννήτριας (που είναι η τάση χωρίς φορτίο) όταν μεταβάλλεται η ένταση διέγερσης για σταθερή ταχύτητα περιστροφής λέγεται χαρακτηριστική στο κενό ή στατική χαρακτηριστική του εναλλακτήρα και φαίνεται στο Σχήμα 1.9. Στην χαρακτηριστική διακρίνονται δύο τμήματα : η γραμμική περιοχή όπου η E ανάλογη του ρεύματος διέγερσης και η περιοχή κορεσμού όπου σημαντική αύξηση του ρεύματος διέγερσης έχει σαν αποτέλεσμα μικρή μόνο αύξηση της τάσης. Οι γεννήτριες κατασκευάζονται να λειτουργούν στην αρχή της περιοχής κορεσμού στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας.



είναι
ώστε

1.3.5. Λειτουργία υπό φορτίο

Όταν η γεννήτρια λειτουργεί στο κενό με τις ονομαστικές στροφές, η τάση στα άκρα του είναι ίση με την ΗΕΔ και εξαρτάται μόνο από την τιμή της έντασης διέγερσης. Συνδέοντας φορτίο (σύνθετες αντιστάσεις) και κρατώντας σταθερή την διέγερση η τάση του εναλλακτήρα μεταβάλλεται και εξαρτάται εκτός των άλλων και από το είδος του φορτίου (ωμικό, επαγωγικό ή χωρητικό) που εκφράζεται με τον συντελεστή ισχύος του. Έτσι προκύπτουν χαρακτηριστικές υπό φορτίο με την μορφή του Σχήματος 1.10.



Σχήμα 1.10: Χαρακτηριστικές φόρτισης

Οι σχέσεις τάσεων και ρευμάτων για τις συνδεσμολογίες σε αστέρα είναι

$$U_{\phi} = U/1.73 \text{ και } I_{\phi} = I$$

και σε τρίγωνο

$$U_{\phi} = U \text{ και } I_{\phi} = I/1.73$$

Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος της γεννήτριας είναι η διακύμανση τάσεως από το κενό

(U_0) μέχρι το ονομαστικό φορτίο (U_n) που ορίζεται σαν

$$\varepsilon\% = 100 (U_0 - U_n)/U_n$$

Η ρύθμιση τάσης της γεννήτριας όταν μεταβάλλεται το φορτίο του γίνεται πάντα μέσω της έντασης διέγερσης και πραγματοποιείται με αυτόματο ρυθμιστή που προσαρμόζει πάντα την διέγερση ώστε να υπάρχει στην έξοδο η σταθερή ονομαστική τάση. Έτσι, ανάλογα με το είδος του φορτίου η γεννήτρια υπερδιεγείρεται σε επαγωγικά φορτία και υποδιεγείρεται σε χωρητικά φορτία.

1.3.6. Χαρακτηριστικά στοιχεία γεννητριών

Με την βοήθεια οργάνων που έχει κάθε εγκατάσταση γεννήτριας μπορεί να μετρηθεί κατά την λειτουργία του η πολική τάση U , η ένταση γραμμής I και η πραγματική ισχύς P που αποδίδεται στο δίκτυο. Από τα μεγέθη αυτά μπορεί να υπολογισθεί η φαινομένη ισχύς S και η άεργος ισχύς Q που παρέχει ο εναλλακτήρας όπως και ο συντελεστής ισχύος $\cos\phi$ με τις γνωστές από την ηλεκτροτεχνία σχέσεις που ακολουθούν στον Πίνακα 1

	Μονοφασικός έναλλακτήρ	Τριφασικός έναλλακτήρ	Διά μονοφασικών και τριφασικών έναλλακτῆρα
Φαινομένη Ισχύς (VA)	$N_s = U \cdot I$	$N_s = 1,73 \cdot U \cdot I$	$N_s = \sqrt{N^2 + N_b^2}$ $N_s = \frac{N}{\text{συνφ}}$
Πραγματική Ισχύς (W)	$N = U \cdot I \cdot \text{συνφ}$	$N = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \text{συνφ}$	$N = \sqrt{N_s^2 - N_b^2}$ $N = N_s \cdot \text{συνφ}$
Άεργος Ισχύς (var)	$N_b = U \cdot I \cdot \eta\mu\phi$	$N_b = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \eta\mu\phi$	$N_b = \sqrt{N_s^2 - N^2}$ $N_b = N_s \cdot \eta\mu\phi$
Συντελεστής Ισχύος	$\text{συνφ} = \frac{N}{U \cdot I}$	$\text{συνφ} = \frac{N}{1,73 \cdot U \cdot I}$	$\text{συνφ} = \frac{N}{N_s}$

Πίνακας 1: Σχέσεις υπολογισμού της ισχύος

Οι γεννήτριες κατασκευάζονται για μια ορισμένη ονομαστική τάση λειτουργίας που δίνεται πάντα από τον κατασκευαστή σαν πολική τάση πχ. 380V ή 15kV. Το μέγεθος της γεννήτριας χαρακτηρίζεται από την ονομαστική του ισχύ που είναι η φαινομένη ισχύς που η γεννήτρια μπορεί να δίνει συνεχώς στην ονομαστική της τάση χωρίς κίνδυνο καταστροφής των μονώσεών της από υπερθέρμανση.

Στην πινακίδα της γεννήτριας εκτός της ονομαστικής ισχύος, τάσης, έντασης, του ονόματος του κατασκευαστή και του αριθμού της κατασκευής γράφονται και τα εξής στοιχεία :

- α) ο αριθμός των φάσεων,
- β) η συχνότητα του ρεύματος
- γ) ο ονομαστικός συντελεστής ισχύος με βάση τον οποίο έχει υπολογισθεί η ισχύς της κινητήριας μηχανής
- δ) η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής
- ε) η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση και τάση διέγερσης

Επίσης στην πινακίδα μπορεί να γράφεται και το είδος της επιτρεπόμενης λειτουργίας (συνεχής, διακοπτόμενη) και στην περίπτωση που δεν γράφεται αυτό η λειτουργία θεωρείται συνεχής.

1.3.7. Απώλειες και βαθμός απόδοσης γεννήτριας

Οι απώλειες των γεννητριών που λειτουργούν με σταθερή συχνότητα διακρίνονται στις σταθερές απώλειες P_1 που είναι οι μηχανικές απώλειες, οι μαγνητικές απώλειες και οι ηλεκτρικές απώλειες διέγερσης ($U_{δΙδ}$) που δεν εξαρτώνται από το φορτίο και στις μεταβλητές απώλειες P_2 που είναι οι ηλεκτρικές απώλειες του τυλίγματος στάτη. Αν R είναι η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος τυμπάνου και I η ένταση γραμμής τριφασικής γεννήτριας, τότε οι μεταβλητές απώλειες είναι

Για σύνδεση αστέρα $P_2 = 3RI^2$

Για σύνδεση τριγώνου $P_2 = RI^2$

Οι συνολικές απώλειες της γεννήτριας είναι $\Sigma P = P_1 + P_2$ και ο βαθμός απόδοσης είναι

$$\eta = \frac{P}{P + \Sigma P}$$

με P την αποδιδόμενη πραγματική ισχύ στο δίκτυο.

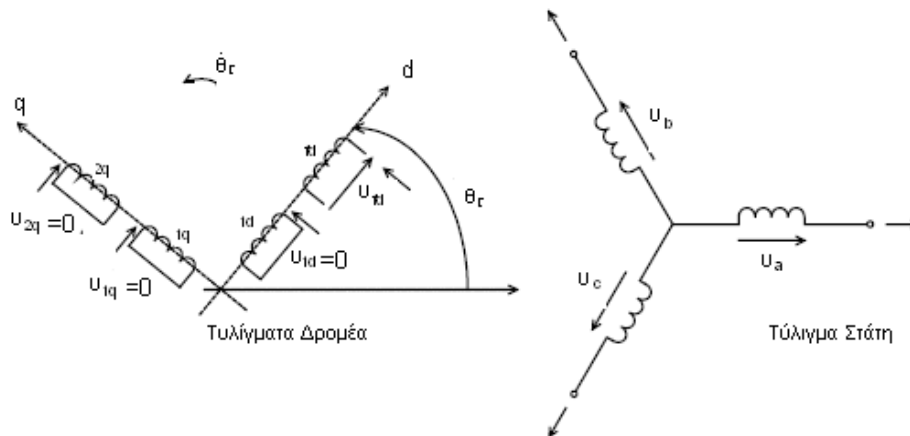
Είναι προφανές ότι ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος της μονάδας. Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από το φορτίο της γεννήτριας.

1.4. Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας

Ως γνωστόν μια σύγχρονη ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από δύο μέρη, ένα σταθερό που λέγεται στάτης και ένα στρεφόμενο που λέγεται δρομέας. Τα δύο αυτά μέρη χωρίζονται από ένα μικρό διάκενο αέρα.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων του εξεταζόμενου μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- (i) Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου.
- (ii) Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα.
- (iii) Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης αμελείται.
- (iv) Η συνεισφορά του μαγνητικού κορεσμού αμελείται.



Σχ 1.1: Παράσταση τυλιγμάτων σύγχρονης μηχανής

Το κύκλωμα του στάτη αποτελείται από τα τριφασικά τυλίγματα του τυμπάνου. Τα τυλίγματα αυτά έχουν στιγμιαίες τάσεις U_a, U_b, U_c και στιγμιαία ρεύματα i_a, i_b, i_c αντίστοιχα. Τα ρεύματα αυτά θεωρούνται θετικά όταν εξέρχονται από τη μηχανή.

Το κύκλωμα του δρομέα αποτελείται από το τύλιγμα του πεδίου διεγέρσεως καθώς και τρία τυλίγματα αποσβέσεως. Το τύλιγμα διεγέρσεως καθώς και το ένα από τα τρία τυλίγματα αποσβέσεως είναι τοποθετημένα κατά μήκος του ευθύ μαγνητικού άξονα (d) ενώ τα άλλα δύο τυλίγματα αποσβέσεως κατά μήκος του εγκάρσιου μαγνητικού άξονα (q). Ο εγκάρσιος άξονας προπορεύεται του ευθύ κατά 90° . Επιπλέον, στο τύλιγμα διεγέρσεως επιβάλλεται συνεχής τάση, έστω U_{fd} , ενώ όλα τα τυλίγματα αποσβέσεως είναι βραχυκυκλωμένα.

Ο δρομέας, όντας το στρεφόμενο μέρος της μηχανής, κινείται. Η κίνηση του αυτή χαρακτηρίζεται από την ηλεκτρική γωνία η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στον ευθύ άξονα (d) και τον άξονα της φάσης a του στάτη. Συμβολίζουμε τη γωνία αυτή με το θ_r .

Κεφάλαιο 2^ο

Ευστάθεια Συστήματος

2.1. Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1.1. Ορισμός Ευστάθειας

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από πολλές διασυνδεδεμένες σύγχρονες γεννήτριες. Οι γεννήτριες αυτές παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια η οποία μέσω των γραμμών μεταφοράς καταλήγει στους καταναλωτές. Προκειμένου το σύστημα να λειτουργεί ομαλά οι γεννήτριες θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ τους σε συγχρονισμό, δηλαδή να περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Σε μια τέτοια περίπτωση η κατάσταση του συστήματος θεωρείται ευσταθής. Αντίθετα, αν έστω και μια γεννήτρια επιταχύνεται ή επιβραδύνεται πέρα από τη σύγχρονη ταχύτητα και οδηγείται σε αποσυγχρονισμό η κατάσταση του συστήματος θεωρείται ασταθής.

Η μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος έγκειται στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα αντιδράσει σε μια διαταραχή. Ο τρόπος αυτός εξαρτάται από τον τύπο της διαταραχής. Γενικά υπάρχουν δύο κατηγορίες ευστάθειας : η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως και η μεταβατική ευστάθεια.

Η ευστάθεια μονίμου καταστάσεως αφορά τις μικρές διαταραχές. Καλείται να απαντήσει στο ερώτημα αν μετά από μια μικρή διαταραχή οι γεννήτριες θα επανέλθουν στο αρχικό σημείο λειτουργίας τους ή θα απομακρυνθούν οριστικά από αυτό. Η μεταβατική ευστάθεια αφορά τις σοβαρές διαταραχές (π.χ. βραχυκυκλώματα). Καλείται να απαντήσει στο ερώτημα αν μετά από μια σοβαρή διαταραχή στο δίκτυο αν θα μπορέσουν να ξαναβρεθούν οι γεννήτριες σε κατάσταση συγχρονισμού ή μία τουλάχιστον θα αποσυγχρονιστεί. [2]

Η ευστάθεια των ΣΗΕ ορίζεται από την ικανότητα του συστήματος, για ένα δεδομένο αρχικό λειτουργικό σημείο, να επανακτά ένα αποδεκτό σημείο λειτουργίας μετά από μία διαταραχή, η οποία οδηγεί τις περισσότερες μεταβλητές του συστήματος κοντά στα όριά τους, ώστε το συνολικό σύστημα να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο [7].

Ο ορισμός αυτός μπορεί να εφαρμοστεί για τον χαρακτηρισμό της ευστάθειας ενός διασυνδεδεμένου ΣΗΕ. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις το ενδιαφέρον ως προς την ευστάθεια επικεντρώνεται σε μία συγκεκριμένη περιοχή ή σε ένα σύνολο γεννητριών. Ειδικότερα, μία απομονωμένη γεννήτρια είναι πιθανό να αποσυγχρονιστεί από το δίκτυο, χωρίς να έχει προηγηθεί εμφάνιση φαινομένου αστάθειας στο υπόλοιπο σύστημα.

Τα ΣΗΕ είναι πολύπλοκα μη γραμμικά συστήματα τα οποία λειτουργούν σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, στο οποίο τα φορτία, οι έξοδοι των γεννητριών και ένα σύνολο λειτουργικών παραμέτρων αλλάζουν διαρκώς τιμές. Η διατήρηση της ευσταθούς λειτουργίας ενός ΣΗΕ στο ενδεχόμενο μίας διαταραχής εξαρτάται από τις αρχικές λειτουργικές συνθήκες, καθώς επίσης και από τη φύση της διαταραχής.

Τα ΣΗΕ υπόκεινται σε ένα μεγάλο πλήθος μικρών και μεγάλων διαταραχών. Οι μικρές διαταραχές συμβαίνουν διαρκώς, αν αναλογιστεί κανείς ότι το ηλεκτρικό φορτίο των διαφόρων καταναλωτών μεταβάλλεται συνεχώς. Στις περιπτώσεις αυτές, το εξεταζόμενο σύστημα θα πρέπει να διαθέτει την ικανότητα της άμεσης προσαρμογής στις εκάστοτε λειτουργικές συνθήκες, ώστε να αποκρίνεται ικανοποιητικά. Επίσης, είναι επιθυμητή η αντοχή του συστήματος σε ιδιαίτερα κρίσιμες διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς ή η απώλεια μίας μεγάλης μονάδας παραγωγής. Μία κρίσιμη διαταραχή μπορεί να προκαλέσει την ενεργοποίηση ορισμένων διακοπών προστασίας, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου και τη δημιουργία δύο ή περισσότερων νησίδων.

Σε ένα σύνολο σημείων ισορροπίας, ένα ΣΗΕ μπορεί να είναι ευσταθές για μία δεδομένη μεγάλη διαταραχή και ασταθές για μία άλλη. Όπως γίνεται κατανοητό, η σχεδίαση των ΣΗΕ με σκοπό τη διατήρηση της ευστάθειας σε κάθε πιθανό σενάριο διαταραχών είναι ασύμφορη τόσο από πρακτικής όσο και από οικονομικής πλευράς. Αντιθέτως, η σχεδίαση αυτή πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις διαταραχές οι οποίες εμφανίζουν υψηλά ποσοστά εμφάνισης. Επομένως, η ευστάθεια μεγάλων διαταραχών αναφέρεται πάντα σε ένα συγκεκριμένο σενάριο διαταραχής. Ένα ευσταθές σύνολο σημείων ισορροπίας έχει μία πεπερασμένη περιοχή έλξης και μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή αυτή, τόσο πιο εύρωστο θεωρείται το σύστημα σε μεγάλες διαταραχές. Η περιοχή έλξης των ευσταθών σημείων ισορροπίας μεταβάλλεται ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες του εξεταζόμενου ΣΗΕ.

Η απόκριση ενός ηλεκτρικού δικτύου σε μία διαταραχή μπορεί να εμπλέξει ένα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού. Για παράδειγμα, ένα σφάλμα σε ένα κρίσιμο στοιχείο και η συνακόλουθη απομόνωσή του λόγω της δράσης του αντίστοιχου εξοπλισμού προστασίας, μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στις ροές ισχύος των γραμμών, στις τάσεις των ζυγών και στις ταχύτητες των δρομέων των στρεφόμενων μηχανών. Οι μεταβολές των τάσεων των ζυγών επηρεάζουν τους ρυθμιστές τάσης των γεννητριών και των δικτύων μεταφοράς. Επίσης, οι μεταβολές στην ταχύτητα των σύγχρονων γεννητριών έχουν αντίκτυπο στη

συμπεριφορά των στροβίλων και των ρυθμιστών στροφών. Ταυτόχρονα, οι μεταβολές της τάσης και της συχνότητας επηρεάζουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό την κατανάλωση των φορτίων, ανάλογα με την κατά περίπτωση χαρακτηριστική αυτών. Ακολούθως, οι παραπάνω μεταβολές είναι πιθανό να οδηγήσουν στην ενεργοποίηση ορισμένων διατάξεων προστασίας, οι οποίες με τη σειρά τους θα αποσυνδέσουν τις αντίστοιχες διατάξεις από το δίκτυο, με αποτέλεσμα την περαιτέρω επιβάρυνση του δικτύου, η οποία πιθανώς να καταλήξει σε εκδήλωση φαινομένων αστάθειας.

Εάν το δίκτυο αποκριθεί ευσταθώς μετά από μία διαταραχή, θα οδηγηθεί σε ένα νέο σημείο ισορροπίας, στο οποίο θα διατηρηθεί η ακεραιότητα του δικτύου, δηλαδή για παράδειγμα το σύνολο των γεννητριών και των φορτίων θα συνδέονται μεταξύ τους. Ένα πλήθος γεννητριών και φορτίων είναι πιθανό να αποσυνδεθεί από το δίκτυο είτε εξαιτίας της απομόνωσης του εξοπλισμού που συνδέεται με το σφάλμα είτε λόγω της σκόπιμης απόρριψης ορισμένων διατάξεων προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια της λειτουργίας του υπόλοιπου συστήματος. Στις περιπτώσεις σοβαρών διαταραχών σε διασυνδεδεμένα συστήματα, η επερχόμενη απομόνωση ορισμένων στοιχείων μπορεί να οδηγήσει στο διαχωρισμό του συστήματος σε δύο ή περισσότερες νησίδες (ανεξάρτητες μεταξύ τους), προκειμένου να ικανοποιηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Στη συνέχεια, η δράση των αυτόματων ελεγκτών του συστήματος σε συνδυασμό με τους ανθρώπινους χειρισμούς θα αποκαταστήσουν σταδιακά την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Σε αντίθετη περίπτωση, εάν δηλαδή το σύστημα αποδειχθεί ασταθές, θα οδηγηθεί σε διαδοχικές απώλειες των διατάξεων, με αποτέλεσμα τη σβέση ενός μεγάλου μέρους του συστήματος.

Τα ΣΗΕ υπόκεινται σε συνεχείς διακυμάνσεις μικρού πλάτους. Ωστόσο, στις μελέτες ευστάθειας θεωρείται ότι στο αρχικό σημείο λειτουργίας πριν την κατά περίπτωση εξεταζόμενη διαταραχή, το σύστημα βρίσκεται σε σημείο μονίμου καταστάσεως.

2.1.2. Κατηγοριοποίηση φαινομένων ευστάθειας ΣΗΕ

Ένα τυπικό σύγχρονο ΣΗΕ αποτελεί ουσιαστικά ένα πολυμεταβλητό σύστημα, του οποίου η δυναμική συμπεριφορά επηρεάζεται από ένα τεράστιο σύνολο διατάξεων με διαφορετικές χαρακτηριστικές και ποικίλους ρυθμούς απόκρισης. Ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος και τον τύπο της διαταραχής, είναι πιθανόν να οδηγηθεί το σύστημα σε διαφορετικές μορφές αστάθειας.

Η ευστάθεια των ΣΗΕ αποτελεί ένα ενιαίο πρόβλημα. Εντούτοις, οι τύποι αστάθειας, οι οποίοι μπορεί να εμφανιστούν σε ένα ΣΗΕ, διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και καθιστούν τη μελέτη της ευστάθειας περισσότερο εξειδικευμένη. Έτσι, η ανάλυση της

ευστάθειας των ΣΗΕ πραγματοποιείται με κατάλληλες αναλυτικές τεχνικές κατά περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές οδηγούν σε ένα απλοποιημένο μοντέλο του συστήματος, στο οποίο όμως διατηρείται αναλλοίωτη η δυναμική των φαινομένων που ενδιαφέρουν κάθε φορά.

Συγκεκριμένα, η μελέτη της ευστάθειας των ΣΗΕ περιλαμβάνει την ανάλυση των φαινομένων τα οποία συνεισφέρουν στη διέγερση των μηχανισμών αστάθειας και στη συνέχεια την επεξεργασία μεθόδων ενίσχυσης της ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος. Ανάλογα με τις επιπτώσεις της διαταραχής στο δίκτυο, διακρίνονται η ευστάθεια μικρών και μεγάλων διαταραχών.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η μελέτη ευστάθειας των ΣΗΕ γίνεται με την κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των ΣΗΕ που πραγματοποιείται βάσει των ακόλουθων κριτηρίων:

- Τη φύση του ρυθμού αστάθειας που υποδεικνύεται από τις κυρίαρχες μεταβλητές του συστήματος στις αποκρίσεις των οποίων παρατηρείται η εμφανιζόμενη αστάθεια.
- Το μέγεθος της εξεταζόμενης διαταραχής, το οποίο επηρεάζει τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της αστάθειας.
- Τις διατάξεις, τις διαδικασίες και τη χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εκτίμηση της ευστάθειας.

Η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας των ΣΗΕ σύμφωνα με τον Πίνακα 1.1, γίνεται θεωρώντας τα εξής δύο κριτήρια, τη χρονική κλίμακα εξέλιξης των φαινομένων και την κινητήρια δύναμη των δυναμικών φαινομένων αστάθειας [8].

Χρονική κλίμακα	Παραγωγή (Σύγχρονες Μηχανές)	Φορτία (Μηχανές Επαγωγής)
Βραχυπρόθεσμη	ευστάθεια γωνίας (μικρών διαταραχών/μεταβατική)	βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης
Μακροπρόθεσμη	ευστάθεια συχνότητας	μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης

Πίνακας 1.1: Κατηγοριοποίηση ευστάθειας ΣΗΕ Κινητήρια δύναμη

2.1.3. Ευστάθεια γωνίας

Η ευστάθεια γωνίας αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμένουν σε συγχρονισμό με το δίκτυο μετά από μία διαταραχή. Η ευστάθεια αυτού του είδους εξαρτάται από την ικανότητα κάθε σύγχρονης μηχανής να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής και της μηχανικής ροπής εισόδου.

Το πρόβλημα της αστάθειας γωνίας προϋποθέτει την μελέτη των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Μία βασική παράμετρος στο εξεταζόμενο πρόβλημα είναι ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ενεργός ισχύς εξόδου των σύγχρονων μηχανών, καθώς μεταβάλλονται οι αντίστοιχες γωνίες δρομέα. Σε συνθήκες μονίμου καταστάσεως (σημείο ισορροπίας), η μηχανική ροπή εισόδου είναι ίση με την αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή για κάθε γεννήτρια, ενώ επίσης η ταχύτητα δρομέα παραμένει σταθερή. Εάν συμβεί μία διαταραχή στο σύστημα, η προηγούμενη ισορροπία ανατρέπεται με αποτέλεσμα την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση των δρομέων των μηχανών σύμφωνα με τους νόμους κίνησης μίας στρεφόμενης μάζας. Εάν προσωρινά μία γεννήτρια περιστρέφεται πιο γρήγορα από μία άλλη, η σχετική γωνιακή θέση της πρώτης ως προς δεύτερη θα αυξάνεται. Οπότε, η επακόλουθη διαφορά των γωνιών δρομέα των δύο μηχανών θα μεταφέρει μέρος του φορτίου της βραδύτερης προς την ταχύτερη γεννήτρια, ανάλογα με τη χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα. Αυτή η μεταφορά ισχύος τείνει να μειώσει τη διαφορά των ταχυτήτων περιστροφής των δύο γεννητριών και άρα και τη σχετική γωνιακή τους θέση. Σημειώνεται ότι η χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα είναι εξόχως μη γραμμική. Εάν ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο όριο, τότε μία αύξηση στη διαφορά των δύο γωνιών συνοδεύεται από μία μείωση της μεταφερόμενης ισχύος, ώστε η γωνιακή διαφορά οδηγείται σε περαιτέρω αύξηση. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια εκδηλώνεται εάν το σύστημα δεν έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει την επιπλέον κινητική ενέργεια, η οποία αντιστοιχεί στην διαφορά των ταχυτήτων δρομέα. Για κάθε μία δεδομένη κατάσταση, η διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος εξαρτάται από το εάν οι αποκλίσεις των σχετικών γωνιών δρομέα οδηγούν σε ανάπτυξη επαρκών ροπών αποκατάστασης [9]. Η απώλεια του συγχρονισμού μπορεί να συμβεί μεταξύ μίας μηχανής και του υπόλοιπου συστήματος, ή μεταξύ διαφορετικών ομάδων μηχανών. Στην τελευταία περίπτωση, ο διαχωρισμός και η νησιδοποίηση των διαφορετικών ομάδων μπορεί να διατηρήσει τον συγχρονισμό σε κάθε νησίδα.

Η μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής μίας σύγχρονης μετά από μία διαταραχή μπορεί να αναλυθεί στις εξής δύο συνιστώσες:

- Συνιστώσα ροπής συγχρονισμού, η οποία είναι σε φάση με την απόκλιση της γωνίας δρομέα.

- Συνιστώσα ροπής απόσβεσης, η οποία είναι σε φάση με την απόκλιση της ταχύτητας δρομέα.

Η ευστάθεια γωνίας εξαρτάται από την ύπαρξη και των δύο παραπάνω συνιστωσών της ηλεκτρομαγνητικής ροπής για κάθε σύγχρονη γεννήτρια. Ειδικότερα, η έλλειψη ροπής συγχρονισμού οδηγεί σε απεριοδική αστάθεια, ενώ η έλλειψη ροπής απόσβεσης σχετίζεται με την εμφάνιση ταλαντώσεων αυξανόμενου πλάτους.

Περαιτέρω διαχωρισμός μπορεί να γίνει σε προβλήματα αστάθειας μικρών διαταραχών και προβλήματα μεταβατικής αστάθειας. Η ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από μικρές διαταραχές, το μέγεθος των οποίων επιτρέπει την ανάλυση της ευστάθειας με τη γραμμικοποίηση του συστήματος κοντά σε μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας.

Η ευστάθεια μικρών διαταραχών εξαρτάται από την αρχική λειτουργική κατάσταση του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια μπορεί να εκδηλωθεί με τους εξής δύο τρόπους: α) την αύξηση της γωνίας δρομέα μέσω ενός απεριοδικού ρυθμού λόγω της έλλειψης ροπής συγχρονισμού, ή β) ταλαντώσεις δρομέα αυξανόμενου πλάτους λόγω της έλλειψης ροπής απόσβεσης. Στα σύγχρονα ΣΗΕ, τα προβλήματα ευστάθειας γωνίας μικρών διαταραχών συνδέονται κατά κύριο λόγο με την ανεπαρκή απόσβεση των ταλαντώσεων. Το πρόβλημα της απεριοδικής αστάθειας δεν εμφανίζεται όταν είναι σε λειτουργία οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης των σύγχρονων γεννητριών.

Η ευστάθεια μεγάλων διαταραχών ή μεταβατική ευστάθεια γωνίας σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από αρκετά σοβαρές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή μεταφοράς. Η απόκριση ενός δικτύου σε μία τόσο σοβαρή διαταραχή διακρίνεται από μεγάλες μεταβολές των γωνιών δρομέα των γεννητριών, ενώ επηρεάζεται έντονα από τη μη γραμμική χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα.

Η μεταβατική ευστάθεια εξαρτάται τόσο από το αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος όσο και από τη σοβαρότητα της διαταραχής. Το χρονικό διάστημα σε μελέτες ευστάθειας γωνίας είναι συνήθως της τάξης λίγων δευτερολέπτων μετά τη διαταραχή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις αρκετά μεγάλων ΣΗΕ το διάστημα αυτό μπορεί να επεκταθεί σε λίγες δεκάδες δευτερολέπτων λόγω της κυριαρχίας των ταλαντώσεων διασυνδέσεων.

2.1.4. Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτές τιμές τάσεων σε όλους τους ζυγούς όταν υποβάλλεται σε μία διαταραχή από ένα δεδομένο αρχικό σημείο λειτουργίας. Ο πιο γνωστός είναι ο ακόλουθος ορισμός για την αστάθεια τάσης [8]:

Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα του φορτίου (μέσω της δυναμικής του συμπεριφοράς) να αυξήσει την ισχύ που καταναλώνει πέρα από τη φυσική ικανότητα μεταφοράς του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, η ευστάθεια τάσης εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ισχύος των φορτίων. Η αστάθεια τάσης ενός συστήματος μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως και μερικές δεκάδων λεπτών. Η εξέλιξη ενός σεναρίου αστάθειας τάσης μπορεί να έχει μία από τις παρακάτω καταλήξεις [10]:

1. Μία μη ομαλή μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε εξαιρετικά χαμηλό επίπεδο τάσεων. Η κατάσταση αυτή εμφανίζεται συνήθως όταν οι μηχανισμοί που συνεισφέρουν στην αστάθεια απενεργοποιούνται επειδή συναντούν τα άνω ή κάτω όρια λειτουργίας τους. Τυπική περίπτωση είναι τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, των οποίων οι λήψεις έχουν περιορισμένη περιοχή ρύθμισης.
2. Μία επιτάχυνση του φαινομένου, η οποία οδηγεί στην απότομη βύθιση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του προβλήματος. Στην περίπτωση αυτή, το φαινόμενο ονομάζεται κατάρρευση τάσης. Η κατάρρευση τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μερική ή ολική σβέση του συστήματος.

Κοντά στο σημείο κατάρρευσης, η χρονική απόκριση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του προβλήματος γίνεται πολύ γρήγορη για να καταλήξει σε μία κατακόρυφη πτώση τη χρονική στιγμή της κατάρρευσης [7]. Δηλαδή, στο σημείο της κατάρρευσης έχουμε μία ασυνέχεια στη λειτουργία του συστήματος, η οποία οφείλεται στη συνεχή συμπεριφορά του και όχι σε εξωτερικά από το σύστημα συμβάντα, όπως είναι για παράδειγμα ένα βραχυκύκλωμα ή το άνοιγμα μίας γραμμής διασύνδεσης. Γενικεύοντας την έννοια της κατάρρευσης, μπορούμε να δώσουμε τον εξής ορισμό:

Με τον όρο κατάρρευση εννοούμε μία απότομη καταστροφική μετάβαση (πρακτικά ακαριαία) της κατάστασης ενός συστήματος. Η τελική έκβαση ενός σεναρίου αστάθειας τάσης μπορεί να είναι είτε η απόρριψη φορτίου σε μία περιοχή του δικτύου, είτε η απώλεια μερικών γραμμών μεταφοράς ή άλλων διατάξεων λόγω της δράσης των αντίστοιχων συστημάτων προστασίας, οδηγώντας σε διαδοχικές απώλειες πρόσθετων στοιχείων του

συστήματος. Οι απώλειες αυτές σε συνδυασμό με τη λειτουργία ορισμένων σύγχρονων γεννητριών υπό συνθήκες περιορισμού του ρεύματος πεδίου μπορούν να προκαλέσουν τον αποσυγχρονισμό των τελευταίων [8].

Έτσι, η διαρκής πτώση των τάσεων μπορεί να συσχετιστεί με την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας γωνίας. Στην περίπτωση αυτή, η δράση των συστημάτων προστασίας θα πρέπει να διαχωρίσει τις δύο ομάδες μηχανών, ώστε οι τάσεις να αποκατασταθούν σε αποδεκτά επίπεδα τιμών. Ωστόσο, εάν η νησιδοποίηση του συστήματος πραγματοποιηθεί με λανθασμένο τρόπο, η απώλεια συγχρονισμού θα οδηγήσει τις μηχανές σε υπερπήδηση πόλων μεταξύ τους.

Ειδικότερα, μετά από μία διαταραχή, η καταναλισκόμενη ισχύς των φορτίων τείνει να αποκατασταθεί από: α) τη μεταβολή της ολίσθησης των κινητήρων επαγωγής, β) τη δράση των ρυθμιστών τάσης στο δίκτυο διανομής, γ) την ενεργοποίηση των μηχανισμών ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, ή δ) τη δυναμική των αυτορυθμιζόμενων φορτίων. Η αποκατάσταση των φορτίων αυξάνει την άεργο φόρτιση του συστήματος στο δίκτυο μεταφοράς, οδηγώντας σε περαιτέρω πτώση των τάσεων.

Ένας σημαντικός παράγοντας που συνεισφέρει στη διέγερση των φαινομένων αστάθειας τάσης είναι η πεπερασμένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής-μεταφοράς-διανομής. Η ικανότητα μεταφοράς περιορίζεται καταρχήν από τις απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος στα παθητικά στοιχεία του συστήματος. Επίσης, η υποστήριξη των τάσεων μπορεί να μειωθεί από τον περιορισμό διεγέρσεως των σύγχρονων γεννητριών.

Μολονότι στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, η αστάθεια τάσης συνοδεύεται από βαθμιαία πτώση των τάσεων, μπορεί και να εμφανιστεί περίπτωση αστάθειας τάσης με ανύψωση των τάσεων, η οποία προκλήθηκε από τη χωρητική συμπεριφορά του δικτύου (οι γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής τάσης λειτουργούσαν κάτω από το όριο φυσικής φόρτισης), σε συνδυασμό με την δράση συστημάτων προστασίας υποδιέγερσης, τα οποία προστατεύουν τις σύγχρονες γεννήτριες από την απορρόφηση της περίσσειας αέργου ισχύος. Στην περίπτωση αυτή, η αστάθεια τάσης σχετίζεται με την ανικανότητα του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς να λειτουργεί κάτω από ένα επίπεδο φόρτισης. Ειδικότερα, η αστάθεια τάσης προκλήθηκε στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα από τη δράση των μηχανισμών ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, όταν οι τελευταίοι προσπάθησαν να αποκαταστήσουν τη φόρτιση σε επίπεδα κάτω από το χαμηλότερο επιτρεπτό.

Επιπρόσθετα, προβλήματα αστάθειας τάσης είναι πιθανό να εκδηλωθούν στους τερματικούς ζυγούς των γραμμών ΣΡ, κατά τη διασύνδεση ασθενών συστημάτων. Τα προβλήματα αυτά εμφανίζονται στους σταθμούς των ανορθωτών ή των αντιστροφέων και σχετίζονται με την ανεπιθύμητη χαρακτηριστική της αέργου φόρτισης των μετατροπέων. Η στρατηγική

ελέγχου των τερματικών σταθμών των γραμμών ΣΡ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο την αποφυγή της αστάθειας, καθώς καθορίζει τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος στους συνδέσμους συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Εάν ο παραπάνω έλεγχος προκαλέσει φόρτιση του εναλλασσόμενου συστήματος πέρα από την ικανότητα μεταφοράς του, θα δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας τάσης. Στην περίπτωση αυτή, η εξέλιξη του φαινομένου είναι αρκετά γρήγορη, καθώς εκδηλώνεται σε χρονικό διάστημα μικρότερο του ενός δευτερολέπτου. Εκτός αυτού, αστάθεια τάσης μπορεί να προκληθεί στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα λόγω του ελέγχου στους μετατροπείς των μηχανισμών ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των γραμμών ΣΡ (χρήση μετατροπέων πηγής τάσης και μετατροπέων με πυκνωτές μεταγωγής) έχουν αυξήσει σημαντικά τα όρια ευσταθούς λειτουργίας των γραμμών ΣΡ σε περιπτώσεις διασύνδεσης ασθενών συστημάτων, σε σχέση με τα αντίστοιχα όρια που προκύπτουν από τη χρήση μετατροπέων με μεταγωγή από την τάση της γραμμής.

Όπως και στην περίπτωση της ευστάθειας γωνίας, η ευστάθεια τάσης μπορεί να διαχωριστεί σε ευστάθεια μεγάλων και μικρών διαταραχών. Η ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων σε όλους τους ζυγούς ύστερα από σοβαρές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα η απώλεια μίας μεγάλης μονάδας παραγωγής ή μίας γραμμής διασύνδεσης. Η ικανότητα αυτή προσδιορίζεται από τις χαρακτηριστικές του δικτύου και των φορτίων, καθώς επίσης και από την αλληλεπίδραση μεταξύ των συνεχών και διακριτών συστημάτων προστασίας και ελέγχου. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μεγάλων διαταραχών προϋποθέτει την εξέταση της μη γραμμικής απόκρισης του συστήματος για ικανό χρονικό διάστημα, προκειμένου να εξακριβωθεί επακριβώς η συμπεριφορά και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δυναμικών διατάξεων του δικτύου, όπως οι σύγχρονες γεννήτριες συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ελέγχου και προστασίας, οι κινητήρες και τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής.

Η ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων σε όλους τους ζυγούς, όταν υπόκειται σε μικρές διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα μία ελάχιστη αύξηση στη ζήτηση ενός συγκεκριμένου φορτίου. Ο εξεταζόμενος τύπος ευστάθειας εξαρτάται από τη χαρακτηριστική των φορτίων και των συνεχών ή διακριτών διατάξεων ελέγχου σε μία δεδομένη χρονική στιγμή λειτουργίας. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση του συστήματος κοντά σε μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας, λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο απλουστευτικών παραδοχών. Η γραμμικοποίηση οδηγεί στον υπολογισμό διαφόρων δεικτών και μεγεθών, τα οποία επηρεάζουν την ευστάθεια του συστήματος. Επίσης, προσδιορίζεται η απόκριση των τάσεων σε μικρές μεταβολές των εισόδων ή των παραμέτρων του συστήματος. Σημειώνεται ότι η γραμμικοποίηση δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων

των διατάξεων των ΣΗΕ, όπως π.χ. είναι οι «νεκρές» ζώνες και τα διακριτά βήματα λήψεων των ΣΑΤΥΦ στους μετασηματιστές.

Στις μελέτες ευστάθειας τάσης, το χρονικό διάστημα του ενδιαφέροντος κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα έως μερικές δεκάδες λεπτών. Επομένως, τα φαινόμενα ευστάθειας τάσης μπορεί να ανήκουν τόσο στη βραχυπρόθεσμη όσο και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης αναφέρεται στη δυναμική συμπεριφορά των γρήγορων συνιστωσών ενός ΣΗΕ, όπως είναι οι σύγχρονες μηχανές, οι μηχανές επαγωγής (φορτία αλλά και γεννήτριες), τα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία, καθώς επίσης και οι μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο για τη σύνδεση στο δίκτυο των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής όσο και στους τερματικούς σταθμών των γραμμών ΣΡ. Επιπρόσθετα, στις γρήγορες διατάξεις των ΣΗΕ συμπεριλαμβάνονται και τα Συστήματα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (ΣΠΥ) των σύγχρονων γεννητριών, εφόσον τα τελευταία ενεργοποιούνται στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Η απόκριση των δυναμικών αυτών διατάξεων παριστάνεται με κατάλληλα συστήματα διαφορικών εξισώσεων και εξισώσεων διαφορών. Επίσης, η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης σχετίζεται με την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων κοντά στα φορτία, σε αντίθεση με την αστάθεια γωνίας όπου το αντίστοιχο ενδιαφέρον εστιάζεται κοντά στις μονάδες παραγωγής.

Από την άλλη πλευρά, στη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης επιδρούν βραδύτερες διατάξεις ενός ΣΗΕ, όπως είναι η βαθμίδα περιορισμού του ρεύματος πεδίου στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μονίμου καταστάσεως των ΣΠΥ των σύγχρονων γεννητριών, τα ΣΑΤΥΦ των μετασηματιστών διανομής, οι Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξεως-Αποζεύξεως Στατών Πυκνωτών και τα θερμοστατικά φορτία. Για την ανάλυση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης απαιτούνται δυναμικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος για ένα χρονικό διάστημα μερικών λεπτών. Στις περιπτώσεις αυτές, η αστάθεια μπορεί να οφείλεται: α) στην απώλεια μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, β) στην επίτευξη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, το οποίο ωστόσο είναι ασταθές από πλευράς ευστάθειας μικρών διαταραχών, ή γ) στην απώλεια της περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή, εάν για παράδειγμα οι διορθωτικές κινήσεις εφαρμοστούν σχετικά αργά.

2.1.5. Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τη συχνότητά του εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών μετά από μία διαταραχή, η οποία διαταράσσει το συνολικό ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος [8]. Ειδικότερα, η ευστάθεια συχνότητας εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και ζήτησης με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, μία πιθανή αστάθεια εκδηλώνεται με τη μορφή συνεχών ταλαντώσεων στην τιμή της συχνότητας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στη διαδοχική αποκοπή μονάδων παραγωγής και φορτίων μέχρι την ολική σβέση του συστήματος.

Οι αρκετά σοβαρές διαταραχές δημιουργούν μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές της συχνότητας, των ροών ισχύος, των τάσεων και άλλων μεταβλητών του συστήματος, οδηγώντας σε ενεργοποίηση διατάξεων προστασίας και ελέγχου, των οποίων η συνεισφορά στην ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας ή της ευστάθειας τάσης θεωρείται αμελητέα. Στις διατάξεις αυτές περιλαμβάνονται οι αμοπααραγωγοί των αμμοηλεκτρικών μονάδων, καθώς επίσης και τα συστήματα προστασίας που ενεργοποιούνται σε εξαιρετικά κρίσιμες καταστάσεις, όπως είναι για παράδειγμα τα συστήματα προστασίας μαγνητικής ροής (V/Hz limiters) των σύγχρονων γεννητριών. Σημειώνεται ότι οι διατάξεις αυτές ανήκουν κατά κύριο λόγο στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα, το ενδιαφέρον σε μελέτες ευστάθειας συχνότητας επικεντρώνεται στις λειτουργικές συνθήκες, οι οποίες δημιουργούνται μετά το διαχωρισμό του συστήματος σε ξεχωριστές νησίδες. Στις περιπτώσεις αυτές, το κρίσιμο ερώτημα είναι εάν κάθε νησίδα επιτύχει ευσταθές λειτουργικό σημείο μετά τη διαταραχή με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου. Η ευστάθεια συχνότητας προσδιορίζεται περισσότερο από τη συνολική απόκριση της μέσης συχνότητας κάθε νησίδας, παρά από τη σχετική δυναμική κίνηση των στρεφόμενων μηχανών.

Σε γενικές γραμμές, τα προβλήματα αστάθειας συχνότητας σχετίζονται με αστοχίες του εξοπλισμού προστασίας, με ανεπιτυχή συνεργασία μεταξύ των διατάξεων ελέγχου και προστασίας, με έλλειψη στρεφόμενης εφεδρείας ή με περίσσεια παραγωγής μετά από νησιδοποίηση. Σε απομονωμένα νησιωτικά συστήματα, η ανάλυση της ευστάθειας συχνότητας εξετάζεται για κάθε σενάριο διαταραχής, το οποίο προκαλεί σημαντική απώλεια παραγωγής ή φορτίου. Η ανάλυση ευστάθειας συχνότητας πραγματοποιείται με εξαγωγή κατάλληλων ισοδυνάμων μοντέλων, σύμφωνα με τα οποία θεωρείται ότι όλες οι γεννήτριες και όλα τα φορτία κάθε νησίδας συνδέονται σε έναν κοινό ζυγό.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 1.1, τα φαινόμενα ευστάθειας συχνότητας κατατάσσονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, διότι στη διέγερσή τους κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζουν ορισμένες αργές συνιστώσες του συστήματος, όπως είναι για παράδειγμα οι στρόβιλοι και οι

αντίστοιχοι ρυθμιστές στροφών των μονάδων παραγωγής, καθώς επίσης και τα συστήματα ελέγχου και προστασίας των σύγχρονων γεννητριών.

Κεφάλαιο 3^ο

Ελεγκτές Τάσης

3.1. Εισαγωγικά για τους Ελεγκτές Τάσης

Στη βιβλιογραφία παρατηρούνται πολλές εφαρμογές ελεγκτών τάσης σε σύγχρονες γεννήτριες. Όμως η πλειοψηφία των ελεγκτών αυτών βρίσκονται ενσωματωμένοι στις διατάξεις ρύθμισης της τάσης. Έτσι έμμεσα, όταν γίνεται αναφορά στους ρυθμιστές τάσης, περιλαμβάνεται και ο έλεγχος της στάθμης της τάσης των γεννητριών. Η ρύθμιση και ο έλεγχος της τάσης απαιτούνται για να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της τάσης, αναγκαία προϋπόθεση για τη σύνδεση μιας γεννήτριας σε ένα ΣΗΕ.

Για την αντιμετώπιση προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης απαιτείται σε ορισμένες περιπτώσεις εγκατάσταση δυναμικών συστημάτων άεργου αντιστάθμισης [16], όπως είναι για παράδειγμα τα στατά συστήματα άεργου αντιστάθμισης (Static Var Compensators - SVCs). Τα συστήματα αυτά παρέχουν γρήγορη και ακριβή ρύθμιση των τοπικών τάσεων, ενώ παράλληλα αποφεύγονται οι ανεπιθύμητες υπερτάσεις που προκαλούνται κατά τη σύζευξη των μηχανικά ελεγχόμενων συστοιχιών πυκνωτών.

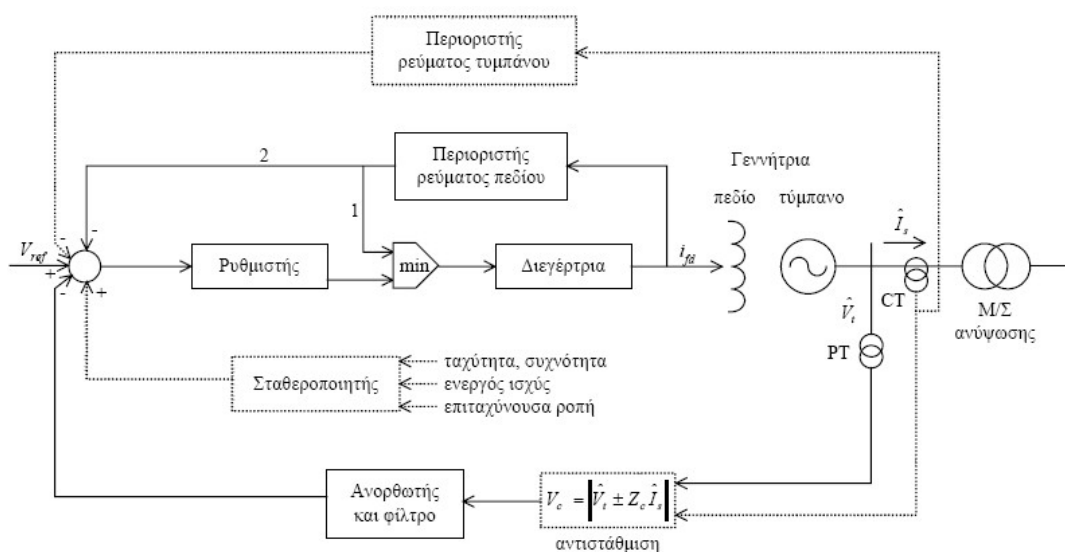
Ένα άλλο σημαντικό μέτρο για την αντιμετώπιση προβλημάτων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι η αποσύνδεση των μηχανών επαγωγής. Το μέτρο αυτό θεωρείται το έσχατο μέτρο για την αντιμετώπιση της αστάθειας, διότι αναφέρεται σε απόρριψη φορτίου

Συγκεκριμένα, οι μεγάλοι βιομηχανικοί κινητήρες (καθώς επίσης και οι μεγάλες ανεμογεννήτριες) έχουν συνήθως συστήματα προστασίας από χαμηλή τάση [18], τα οποία αποσυνδέουν τον κινητήρα (την ανεμογεννήτρια) από το δίκτυο μετά την εμφάνιση χαμηλής τάσης, προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη επιβράδυνση (ή επιτάχυνση).

Αξίζει να σημειωθεί ότι περισσότεροι μικροί κυρίως κινητήρες είναι εξοπλισμένοι με θερμικά στοιχεία προστασίας, τα οποία εμφανίζουν βραδείες αποκρίσεις, της τάξης αρκετών δευτερολέπτων [18]. Επομένως, στις περιπτώσεις αυτές το φαινόμενο της βραχυπρόθεσμης αστάθειας μπορεί να εξελιχθεί δυσμενώς πριν τη δράση των διατάξεων προστασίας, οδηγώντας σε αστάθεια και ενδεχομένως σε αποσυνγχρονισμό των τοπικών σύγχρονων γεννητριών. [14]

3.2. Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης (APT)

Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης (APT) είναι η διάταξη ελέγχου, η οποία κρατάει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) την τερματική τάση της γεννήτριας. Η γενική διάταξη ενός APT φαίνεται στο Σχ. 2.4, όπου οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν βαθμίδες οι οποίες χρησιμοποιούνται προαιρετικά, ενώ οι αριθμημένες συνεχείς γραμμές δείχνουν εναλλακτικές μορφές σχεδίασης της διάταξης [19].



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα βαθμίδων Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης [14]

Σύμφωνα με την παραπάνω διάταξη, το μέτρο V_t της τερματικής τάσης της γεννήτριας μετράται με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή τάσης (PT) και στη συνέχεια ανορθώνεται ώστε να παραχθεί ένα συνεχές (DC) σήμα, το οποίο είναι ανάλογο με την ενεργό τιμή της εναλλασσόμενης (AC) τερματικής τάσης, Z_c ονομάζεται σύνθετη αντίσταση αντιστάθμισης, ενώ το εξερχόμενο ρεύμα στάτη της σύγχρονης γεννήτριας μετράται με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή έντασης (CT).

Ακολούθως, το συνεχές σήμα V_c συγκρίνεται με μία τάση αναφοράς V_{ref} , η οποία αντιπροσωπεύει το επιθυμητό επίπεδο της τερματικής τάσης. Για τον υπολογισμό της τάσης αναφοράς λαμβάνεται υπόψη η αρχική κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας.

Η διαφορά $V_{ref} - V_c$ εισάγεται στην κύρια μονάδα του ρυθμιστή, της οποίας ο ρόλος είναι να αυξήσει την τάση διεγέρσεως της γεννήτριας στην περίπτωση κατά την οποία είτε μειωθεί η τερματική της τάση V_t ή αυξηθεί η τάση αναφοράς V_{ref} και αντιστρόφως.

Συγκεκριμένα, η κύρια μονάδα του ρυθμιστή ενισχύει το παραπάνω σφάλμα και το διαμορφώνει κατάλληλα για να εισαχθεί στο σύστημα διέγερσης. Η διεγέρτρια είναι μία βοηθητική διάταξη η οποία αποδίδει συνεχή τάση στο τύλιγμα του πεδίου της μηχανής.

Στον αθροιστή του APT μπορεί να προστεθεί σήμα από τον σταθεροποιητή συστήματος ισχύος (Power System Stabilizer), ο οποίος αποτελεί μία διάταξη που ενεργοποιείται σε μεταβατικές καταστάσεις και παρέχει πρόσθετη ροπή αποσβέσεως μέσω του συστήματος διέγερσης. Στη μόνιμη κατάσταση ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος έχει μηδενική έξοδο, αφήνοντας ανεπηρέαστη την τερματική τάση της γεννήτριας. Στο Σχ. 3.1 φαίνονται διάφορα σήματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι του εξεταζόμενου σταθεροποιητή.

Επιπρόσθετα, ο APT συνοδεύεται από διάφορα συστήματα περιορισμού, όπως:

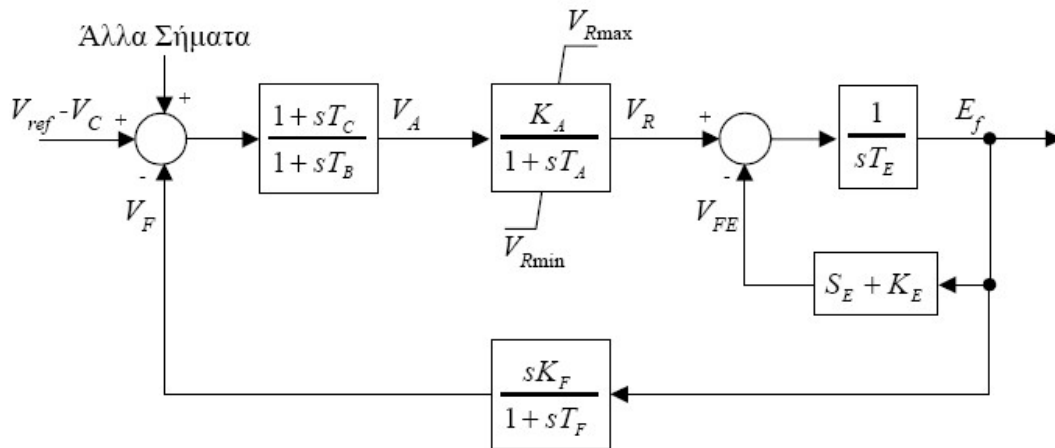
- Το Σύστημα Προστασίας Υποδιεγέρσεως (underexcitation limiter), το οποίο εμποδίζει τη μείωση του ρεύματος διέγερσης κάτω από ένα όριο (το οποίο αντιστοιχεί σε συνθήκες απορρόφησης άεργου ισχύος) για λόγους ευστάθειας. Το θεωρούμενο σύστημα δεν φαίνεται στο Σχ. 3.1.
- Τον Περιοριστή Τάσης/Συχνότητας (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 αυτό επίσης δεν φαίνεται στο Σχ. 3.1
- Το Σύστημα Προστασίας Υπερδιεγέρσεως (overexcitation limiter), το οποίο προστατεύει το τύλιγμα πεδίου από υπερθέρμανση σε περιπτώσεις υψηλού ρεύματος διεγέρσεως.
- Τον Περιοριστή Ρεύματος Τυμπάνου (armature current limiter), ο οποίος προστατεύει το τύλιγμα του τυμπάνου από υπερεντάσεις.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι APT σε όλον τον κόσμο από διάφορες κατασκευάστριες εταιρείες. [14]

3.2.1. Μοντέλο APT με διεγέρτρια Συνεχούς Ρεύματος

Στο Σχ. 3.2 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του APT με διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος, τύπου DC1 κατά IEEE [20].

Στο εξεταζόμενο μοντέλο APT διακρίνεται καταρχήν ένας εσωτερικός βρόχος σταθεροποίησης με διαφορικό κέρδος KF και χρονική σταθερά TF, ο οποίος παράγει ένα σήμα ανατροφοδότησης VF, το οποίο αφαιρείται στον κύριο αθροιστή εισόδου του APT. Στη μόνιμη κατάσταση, το σήμα VF είναι μηδενικό, όπως επίσης και τα υπόλοιπα σήματα που προέρχονται από τις πρόσθετες διατάξεις οι οποίες μπορεί να συνοδεύουν έναν APT και αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα βαθμίδων APT τύπου DC1 κατά IEEE

Στη συνέχεια, το σήμα εξόδου του αθροιστή εισάγεται στη μονάδα ρύθμισης της τάσεως. Η μονάδα αυτή αποτελείται από ένα φίλτρο μεταφορείας ($T_B > T_C$) και το ρυθμιστή τάσης.

Ο ρυθμιστής τάσης προσεγγίζεται από μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτου βαθμού με κέρδος K_A και χρονική σταθερά T_A . Σημειώνεται ότι η έξοδος V_R του ρυθμιστή περιορίζεται από μία μέγιστη (V_{Rmax}) και μία ελάχιστη (V_{Rmin}) τιμή.

Το φίλτρο μεταφορείας (lag-lead filter) αποσκοπεί στη μεταβατική μείωση του συνολικού κέρδους διεγέρσεως στις μέσες συχνότητες, επειδή τα μεγάλα κέρδη διεγέρσεως μπορούν να επηρεάσουν κατά ανεπιθύμητο τρόπο την ευστάθεια του συστήματος. Συγκεκριμένα, ο APT αυτού του τύπου εμφανίζει ένα μεταβατικό κέρδος K_T στις μέσες συχνότητες, το οποίο είναι ίσο με:

$$K_T = \frac{T_C}{T_B} K_A \quad (3.1)$$

δηλαδή μικρότερο από το κέρδος μόνιμου καταστάσεως K_A , εφόσον ισχύει $T_B > T_C$.

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

Στο χώρο κατάστασης, το εξεταζόμενο μοντέλο APT παρουσιάζει τις εξής τέσσερις μεταβλητές κατάστασης:

- Τη μεταβλητή x_{ll} , 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 APT.

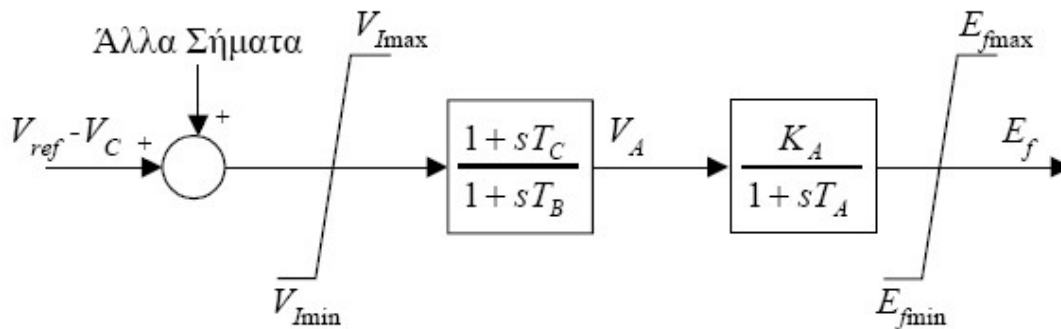
Απαλείφοντας τις αλγεβρικές μεταβλητές V_A (έξοδος του φίλτρου μεταπορείας), V_F , και V_{FE} (σήμα ανατροφοδότησης της διεγέρτριας) και αμελώντας τον περιοριστή του ρυθμιστή τάσεως, προκύπτουν οι ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις, από τις οποίες περιγράφεται το θεωρούμενο μοντέλο APT. Σημειώνεται ότι η μεταβλητή u_{AVR} παριστάνει τα σήματα που προστίθενται στο κύριο αθροιστή εισόδου του APT και τα οποία προέρχονται από τις υπόλοιπες διατάξεις ελέγχου και προστασίας που εξοπλίζουν τη σύγχρονη μηχανή.

$$\begin{aligned} \dot{x}_u &= -\frac{1}{T_B} x_u + \frac{T_B - T_C}{T_B^2} \left[(V_{ref} - V_c + U_{AVR}) - \frac{K_F}{T_F} (E_f - x_{sf}) \right] \\ \dot{V}_R &= -\frac{1}{T_A} V_R + \frac{K_A}{T_A} x_u + \frac{K_A T_C}{T_A T_B} \left[(V_{ref} - V_c + U_{AVR}) - \frac{K_F}{T_F} (E_f - x_{sf}) \right] \\ \dot{x}_{sf} &= -\frac{1}{T_F} x_{sf} + \frac{1}{T_F} E_f \\ \dot{E}_f &= -\frac{S_E(E_f) + K_E}{T_E} E_f + \frac{1}{T_E} V_R \end{aligned} \tag{3.2}$$

3.2.2. Μοντέλο APT με διεγέρτρια Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Στο Σχ. 3.3 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του APT τύπου AC4 κατά IEEE [20]. Το σύστημα διεγέρσεως του εξεταζόμενου APT αποτελείται από μία ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη με θυρίστορ σε συνδεσμολογία γέφυρας, η οποία τροφοδοτείται από μία εναλλασσόμενη γεννήτρια. Η χρονική σταθερά T_A αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση της ρύθμισης, καθώς επίσης και τα φίλτρα για τη μέτρηση του σήματος εισόδου. Η σταθερά K_A

παριστάνει το συνολικό κέρδος μονίμου καταστάσεως του APT. Οι δύο περιοριστές χρησιμεύουν στον περιορισμό των σημάτων εισόδου και εξόδου του APT.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα βαθμίδων APT τύπου AC4 κατά IEEE

Το φίλτρο μεταφορείας ($T_B > T_C$) χρησιμοποιείται για τον ίδιο σκοπό με το προηγούμενο μοντέλο APT τύπου DC1 κατά IEEE.

Στο χώρο κατάστασης, το θεωρούμενο μοντέλο APT αποτελείται από τις εξής δύο μεταβλητές κατάστασης:

- Τη μεταβλητή x_{II} , η οποία συνδέεται με το φίλτρο μεταφορείας.
- Την τάση διεγέρσεως E_f , η οποία είναι και η έξοδος του APT.

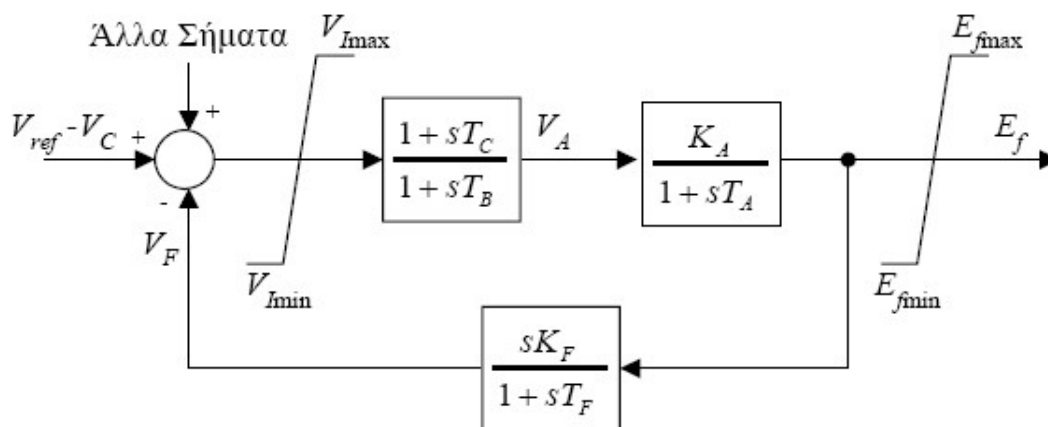
Αμελώντας τους δύο περιοριστές, το εξεταζόμενο μοντέλο APT περιγράφεται από τις εξισώσεις

$$\begin{aligned} \dot{x}_{II} &= -\frac{1}{T_B} x_{II} + \frac{T_B - T_C}{T_B^2} (V_{ref} - V_C + u_{AVR}) \\ \dot{E}_f &= -\frac{1}{T_A} E_f + \frac{K_A}{T_A} x_{II} + \frac{K_A T_C}{T_A T_B} (V_{ref} - V_C + u_{AVR}) \end{aligned}$$

(3.3)

3.2.3. Μοντέλο APT με Διεγέρτρια Στατικού Τύπου

Στο Σχ. 3.4 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων ενός APT με διεγέρτρια στατικού τύπου ST1 κατά IEEE [20].



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα βαθμίδων APT τύπου ST1 κατά IEEE

Στο θεωρούμενο μοντέλο APT διακρίνονται το φίλτρο μεταπορείας, ο ρυθμιστής τάσης, καθώς επίσης και ένας εσωτερικός βρόχος σταθεροποίησης. Οι διεγέρτριες αυτού του τύπου παρουσιάζουν εγγενώς πολύ μικρές σταθερές χρόνου, οπότε κυριαρχεί η σταθερά χρόνου των φίλτρων μετρήσεως.

Στο χώρο κατάστασης, το εξεταζόμενο μοντέλο APT παρουσιάζει τις εξής τρεις μεταβλητές κατάστασης:

- 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 APT.

Αμελώντας τον περιοριστή στο σήμα εισόδου του φίλτρου μεταπορείας, η δυναμική απόκριση του APT περιγράφεται από τις παρακάτω τρεις διαφορικές εξισώσεις

$$\begin{aligned} \dot{x}_{sf} &= -\frac{1}{T_F} x_{sf} + \frac{1}{T_F} E_f \\ \dot{x}_{ll} &= -\frac{1}{T_B} x_{ll} + \frac{T_B - T_C}{T_B^2} \left[(V_{ref} - V_C + u_{AVR}) - \frac{K_F}{T_F} (E_f - x_{sf}) \right] \\ \dot{E}_f &= -\frac{1}{T_A} E_f + \frac{K_A}{T_A} x_{ll} + \frac{K_A T_C}{T_A T_B} \left[(V_{ref} - V_C + u_{AVR}) - \frac{K_F}{T_F} (E_f - x_{sf}) \right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.3. Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης

Η τάση διέγερσης της γεννήτριας δεν μπορεί να αυξάνεται απεριόριστα για να διατηρηθεί η θερματική τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Αν η φόρτιση της γεννήτριας είναι τέτοια ώστε ο APT να επιβάλλει πολύ υψηλές τιμές της τάσης διέγερσης, υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης στο τύλιγμα πεδίου και συνεπώς επιβάλλεται περιορισμός της στα ανώτατα ανεκτά επίπεδα. Ο ρόλος του Συστήματος Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ), είναι να μην επιτρέψει στον APT να αυξήσει την διέγερση της γεννήτριας πέραν των επιτρεπτών ορίων υπερθέρμανσης. Στην περίπτωση που κάποια από τις γεννήτριες φτάσει σε μέγιστο ρεύμα διέγερσης ενεργοποιείται μετά από μία χρονική καθυστέρηση ο περιοριστής ρεύματος διέγερσης και επομένως στο απλοποιημένο μοντέλο η γεννήτρια αυτή αναπαρίσταται από μία σταθερή ΗΕΔ διέγερσης και η ΗΕΔ δεν μπορεί να γίνει μεγαλύτερη κατά μέτρο από αυτή την τιμή, ενώ ταυτόχρονα η θερματική τάση αλλά και η παρεχόμενη στο δίκτυο άεργος ισχύς δεν ελέγχονται πλέον από τη γεννήτρια. Με την αλλαγή λειτουργίας της γεννήτριας πρέπει να επαναπροσδιοριστούν οι παραγόμενες ισχύς της γεννήτριας. Υπάρχουν τρεις ταξινομήσεις για τα ΣΠΥ [23].

Η πρώτη διακρίνει τα ολοκληρωτικά ΣΠΥ, τα οποία επιβάλλουν ρεύμα διέγερσης ακριβώς ίσο με το μέγιστο Iflim, αφού δράσουν δηλαδή έχουν μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης, από τα αναλογικά ΣΠΥ στα οποία το ρεύμα διέγερσης μετά την δράση του περιοριστή διαφέρει λίγο από το Iflim.

Η δεύτερη διάκριση αφορά το είδος της χρονικής καθυστέρησης για την ενεργοποίηση του ΣΠΥ. Το ΣΠΥ γενικά δεν περιορίζει το ρεύμα διέγερσης ακαριαία μετά την υπερδιέγερση, αλλά έχει μία χρονική καθυστέρηση. Στα ΣΠΥ σταθερού χρόνου, ο περιοριστής ενεργοποιείται μετά από σταθερό χρονικό διάγραμμα μετά την υπερδιέγερση (αρκεί φυσικά η υπερδιέγερση να συνεχίσει να υφίσταται κατά την διάρκεια αυτής της καθυστέρησης. Στα ΣΠΥ αντίστροφου χρόνου, η χρονική καθυστέρηση είναι αντιστρόφως ανάλογη της υπερδιέγερσης If – Iflim.

Υπάρχουν δύο πιθανά “σημεία σύνδεσης” του ΣΠΥ σε σχέση με τον APT. Η περίπτωση των διακοπτικών ΣΠΥ (takeover OXL's), τα οποία συνδέονται μετά την ρυθμιστική διάταξη του APT, παρακάμπτοντάς τον. Και η περίπτωση που αντιστοιχεί στα αθροιστικά ΣΠΥ (summed type OXL's), τα οποία συνδέονται στον αθροιστή πριν από τον ρυθμιστή του APT. Οι εξισώσεις ισορροπίας για τα δύο είδη είναι εν γένει διαφορετικές.

Οι τρεις βασικοί τύποι OXL είναι

- Ολοκληρωτικό ή αναλογικό - ολοκληρωτικό ΣΠΥ:

Ανεξάρτητα από το αν συνδέεται ως αθροιστικό ή διακοπτικό, αυτό το ΣΠΥ, αφού ενεργοποιηθεί, επιβάλλει στην ισορροπία ΗΕΔ διέγερσης E_f ακριβώς ίση στο ανά μονάδα σύστημα με την I_{flim}

$$E_{f,oxl} = I_{flim} \quad (3.5)$$

- Διακοπτικό ΣΠΥ με αναλογική μονάδα ελέγχου:

Αφού ενεργοποιηθεί αυτό το ΣΠΥ, δηλαδή αφού παρέλθει η χρονική καθυστέρηση μετά την υπερδιέγερση, η ΗΕΔ διέγερσης (αγνοώντας τον κορεσμό της διεγέρτριας αν αυτή είναι στρεφόμενη) είναι ίση με:

$$E_{f,oxl} = \frac{E_{fo} + K_P I_{flim}}{K_P + 1} \quad (3.6)$$

E_{fo} : ΗΕΔ διέγερσης της γεννήτριας την στιγμή της υπερδιέγερσης

K_P : Αναλογικό κέρδος του ΣΠΥ

Η ΗΕΔ διέγερσης μετά την ενεργοποίησή του είναι σταθερή και δίνεται από την 3.6 κάτι που δεν ισχύει στην επόμενη περίπτωση.

- Αθροιστικό ΣΠΥ με αναλογική μονάδα ελέγχου:

Η ακόλουθη σχέση δίνει την εξίσωση ισορροπίας για την ΗΕΔ διέγερσης, μετά την ενεργοποίηση ενός αθροιστικού ΣΠΥ:

$$E_{f,oxl} = \frac{K_A}{1 + K_A K_P} (V_{ref} - V) + \frac{K_A K_P}{1 + K_A K_P} I_{flim} \quad (3.7)$$

K_A : Αναλογικό κέρδος ΑΡΤ

K_P : Αναλογικό κέρδος ΣΠΥ

Επειδή το ΣΠΥ είναι αθροιστικό, δηλαδή δεν παρακάμπτει τον ΑΡΤ όταν ενεργοποιηθεί, υπάρχει ο παράγοντας $V_{ref}-V$ στην εξίσωση (3.7), άρα η E_f συνεχίζει να έχει μία μικρή ευαισθησία ως προς την τάση στον ζυγό της γεννήτριας, ακόμη και μετά την ενεργοποίηση του ΣΠΥ, σε αντίθεση με τα δύο προαναφερθέντα είδη ΣΠΥ.

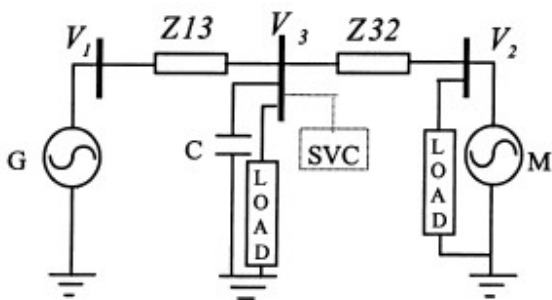
3.4. Μη Γραμμικοί Ελεγκτές Τάσης

Σε πολλές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία προτείνεται μεθοδολογία για τη σχεδίαση ενός μη γραμμικού ελεγκτή σε στατό σύστημα αέργου αντιστάθμισης, προκειμένου να ενισχυθεί ένα ΣΗΕ από πλευράς ευστάθειας τάσης. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται σε ένα απλό δίκτυο με μία σύγχρονη και μία ασύγχρονη μηχανή, για να ακολουθήσει στη συνέχεια ανάλυση του δικτύου αυτού τόσο με θεωρία διακλαδώσεων όσο και με χρονικές προσομοιώσεις.

Η θεωρία βασίζεται στην αντιστάθμιση της αέργου ισχύος με τα Static VAR Compensator (or SVC), τα οποία είναι διατάξεις για την παροχή αέργου ισχύος σε δικτύων υψηλής τάσης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούν μέρος της οικογένειας για την ευστάθεια των AC συστημάτων. Ο όρος "στατική" αναφέρεται στο γεγονός ότι το SVC δεν έχει κινούμενα μέρη (εκτός από διακόπτες και αποσυνδέει, τα οποία δεν λειτουργούν υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας).

Το SVC είναι ένα αυτοματοποιημένο σύστημα, με σκοπό να φέρει το συντελεστή ισχύος πλησιέστερα προς τη μονάδα. Αν το φορτίο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι χωρητικού, το SVC θα χρησιμοποιήσει αντιδραστήρες (συνήθως με τη μορφή ελεγχόμενων θυρίστορ) για να καταναλώσουν άεργο ισχύ από το σύστημα από το σύστημα, μειώνοντας την τάση του συστήματος. Αν το φορτίο έχει επαγωγικό χαρακτήρα, οι πυκνωτές αυτόματα αλλάζουν, παρέχοντας έτσι στο σύστημα υψηλότερη τάση.

Σε πειραματικές διατάξεις το SVC συνδέθηκε σε σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές και βρέθηκε ότι η κατάρρευση της τάσης αναβάλλεται με μη γραμμικούς ελεγκτές. Έτσι η ευστάθεια της τάσης βελτιώνεται αισθητά. Επίσης τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόδοση τέτοιων ελεγκτών είναι ανώτερη από την αντίστοιχη απόδοση των συμβατικών ελεγκτών. Στο Σχ. 3.5 φαίνεται η σύνδεση του ελεγκτή με την πειραματική διάταξη των δύο μηχανών. [17]



Σχήμα 3.5: Σύνδεση μη γραμμικών ελεγκτών τάσης με σύγχρονη και ασύγχρονη μηχανή

Κεφάλαιο 4ο

Ελεγκτές Συχνότητας

4.1. Εισαγωγικά για τους Ελεγκτές Συχνότητας

Οι ελεγκτές συχνότητας είναι εξαιρετικά σημαντικοί στα ΣΗΕ και στις διατάξεις που συνδέονται σε αυτά. Εμφανίζονται σαν τμήματα διατάξεων ρύθμισης και ελέγχου της ισχύος ή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας και όχι σαν ξεχωριστές διατάξεις.

4.2. Σταθεροποιητές Συστήματος Ισχύος

Ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος (Power System Stabilizer) είναι μία διάταξη η οποία επιδρά στο σύστημα διέγερσης μίας σύγχρονης γεννήτριας με σκοπό να παρέχει πρόσθετη ροπή απόσβεσης στις ταλαντώσεις του δρομέα της σε ένα επιθυμητό εύρος συχνοτήτων [21]. Για το σκοπό αυτό, ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος παράγει στην έξοδό του μία συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής, η οποία είναι εν φάση με την απόκλιση της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας. Ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος λειτουργεί σταθεροποιητικά για τη γεννήτρια στη μεταβατική κατάσταση, αφήνοντας ανεπηρέαστη την τερματική της τάση στη μόνιμη κατάσταση.

Σαν είσοδοι του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σήματα ανάλογα είτε της ταχύτητας του δρομέα, είτε της συχνότητας εξόδου ή ακόμα της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας.

Η ροπή απόσβεσης των γεννητριών ελαχιστοποιείται σε συνθήκες πλήρους φόρτισης του συστήματος. Αν σε αυτές τις συνθήκες συμβεί μια διαταραχή και το δίκτυο “εξασθενίσει” είναι πιθανό να εμφανιστούν μη αποσβενύμενες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις ανάμεσα στις γεννήτριες. Η δράση των σταθεροποιητών σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης εξασφαλίζει την απόσβεση των ταλαντώσεων και την ευσταθή λειτουργία του συστήματος. Για το λόγο αυτό η σχεδίαση των σταθεροποιητών γίνεται για ένα σημείο λειτουργίας όπου το σύστημα είναι σε πλήρη φόρτιση και οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσεως έχουν μεγάλες τιμές κέρδους.

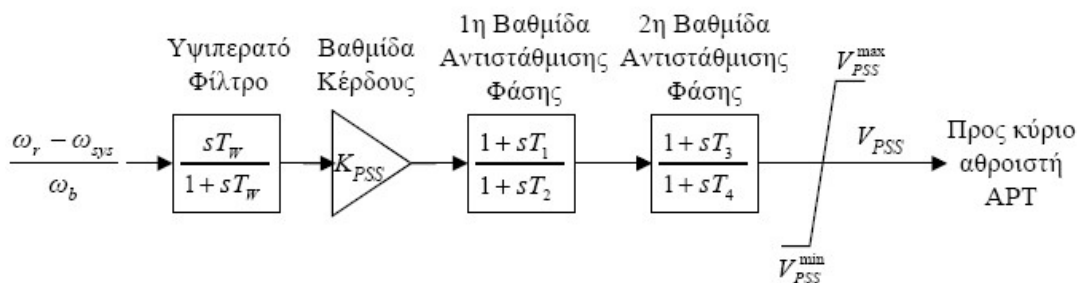
Η σχεδίαση ενός σταθεροποιητή θα πρέπει να γίνεται σε συνθήκες μέγιστης (ή σχεδόν μέγιστης) φόρτισης του συστήματος και αυτό γιατί κάτω από αυτές τις συνθήκες η ροπή αποσβέσεως των γεννητριών ελαχιστοποιείται και μια ενδεχόμενη διαταραχή είναι πολύ

πιθανόν να έχει σαν απόρροια την εμφάνιση μη αποσβενύμενων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων ανάμεσα στις γεννήτριες. Συνεπώς, αν ο σταθεροποιητής σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να εξασφαλίσει την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων κάτω από τις συνθήκες αυτές τότε θα μπορεί να εγγυηθεί και την γενικότερη ευσταθή λειτουργία του συστήματος.

Αφού εξασφαλιστεί ότι το σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης γίνεται ανάλυση των ρυθμών απόκρισής του. Σκοπός είναι να βρεθούν εκείνοι οι ηλεκτρομηχανικοί ρυθμοί οι οποίοι χρήζουν ανάγκης περαιτέρω αποσβέσεως. Εν συνεχεία ακολουθείται συνοπτικά η εξής διαδικασία:

- i) Επιλέγεται η γεννήτρια στην οποία θα πρέπει να προσαρτηθεί ο σταθεροποιητής προκειμένου να αποσβεσθεί ο εκάστοτε ηλεκτρομηχανικός ρυθμός.
- ii) Υπολογίζεται η γωνία αντιστάθμισης και η συνάρτηση μεταφοράς του σταθεροποιητή
- iii) Υπολογίζεται το κέρδος του σταθεροποιητή

Στο Σχ. 4.1 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα βαθμίδων σταθεροποιητή συστήματος ισχύος

Το εξεταζόμενο μοντέλο έχει σαν είσοδο την ανά μονάδα απόκλιση της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα, και αποτελείται από ένα υπιπερατό φίλτρο, δύο διατάξεις αντιστάθμισης φάσης και μία βαθμίδα κέρδους. Το σήμα εξόδου V_{PSS} του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος προστίθεται στον κύριο αθροιστή εισόδου του ΑΡΤ της γεννήτριας.

Το υπιπερατό φίλτρο διαθέτει αρκετά μεγάλη σταθερά χρόνου T_w ώστε να επιτρέπει στα σήματα που σχετίζονται με τις ταλαντώσεις της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα να το διαπερνούν αναλλοίωτα. Αν δεν υπήρχε το φίλτρο αυτό, η τερματική τάση της γεννήτριας

θα επηρεαζόταν από σταθερές μεταβολές της ταχύτητας του δρομέα της. Επομένως, η παρουσία του εξασφαλίζει ότι ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος ενεργοποιείται μόνο σε μεταβολές (ταλαντώσεις) της ταχύτητας της μηχανής.

Ακολούθως, κάθε μία διάταξη αντιστάθμισης φάσης παρέχει την επιθυμητή γωνία προπορείας ($T1 > T2$ και $T3 > T4$) ώστε να αντισταθμιστεί η διαφορά φάσης μεταξύ της εισόδου της διεγέρτριας και της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Στο θεωρούμενο μοντέλο χρησιμοποιούνται δύο βαθμίδες αντιστάθμισης φάσης, ωστόσο σε άλλα μοντέλα συναντώνται ακόμα περισσότερες βαθμίδες.

Συνήθως, η συχνότητα των προς απόσβεση ταλαντώσεων κυμαίνεται από 0.1 έως 2 Hz και επομένως η συνολική διάταξη της αντιστάθμισης φάσης σχεδιάζεται ώστε να αποκρίνεται στο παραπάνω εύρος. Σημειώνεται πάντως ότι σε γενικές γραμμές η διαφορά φάσης δεν αντισταθμίζεται πλήρως, με αποτέλεσμα ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος εκτός της ροπής αποσβέσεως να μεταβάλλει και τη ροπή συγχρονισμού.

Τέλος, η βαθμίδα κέρδους καθορίζει το μέγεθος της απόσβεσης που εισάγεται από τη διάταξη του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του κέρδους KPSS, τόσο μεγαλύτερη ροπή απόσβεσης εισάγει η διάταξη αυτή. Ωστόσο, για λόγους ευστάθειας και λόγω του περιοριστή το παραπάνω κέρδος δεν μπορεί να ξεπεράσει μία μέγιστη τιμή.

Στο χώρο κατάστασης, το εξεταζόμενο μοντέλο σταθεροποιητή συστήματος ισχύος παρουσιάζει τις εξής τρεις μεταβλητές κατάστασης:

- Τη μεταβλητή δ , η οποία συνδέεται με το υπερυψηλό φίλτρο στην είσοδο. PSSWx
- Τις μεταβλητές θ_1 και θ_2 , οι οποίες συνδέονται με τις δύο βαθμίδες αντιστάθμισης φάσης. PSSx1PSSx2

Η δυναμική απόκριση των μεταβλητών αυτών περιγράφεται από το ακόλουθο σύνολο διαφορικών εξισώσεων:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_W^{PSS} &= -\frac{1}{T_W} x_W^{PSS} + \frac{1}{T_W} \frac{\omega_r - \omega_{sys}}{\omega_b} \\
\dot{x}_1^{PSS} &= -\frac{1}{T_2} x_1^{PSS} + \frac{K_{PSS}}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \left[\frac{\omega_r - \omega_{sys}}{\omega_b} - x_W^{PSS} \right] \\
\dot{x}_2^{PSS} &= -\frac{1}{T_4} x_2^{PSS} + \frac{1}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \left[x_1^{PSS} + K_{PSS} \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{\omega_r - \omega_{sys}}{\omega_b} - x_W^{PSS} \right) \right]
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Το σήμα εξόδου VPSS του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος είναι:

$$V_{PSS} = x_2^{PSS} + \frac{T_3}{T_4} \left[x_1^{PSS} + K_{PSS} \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{\omega_r - \omega_{sys}}{\omega_b} - x_W^{PSS} \right) \right] \tag{4.2}$$

Άρα το σήμα αυτό φράσσεται από μία ελάχιστη και μία μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή

$$u_{AVR} = V_{PSS} \quad \mu\epsilon \quad V_{PSS}^{\min} \leq V_{PSS} \leq V_{PSS}^{\max} \tag{4.3}$$

4.3. Έλεγχος Στροφών Γεννήτριας

Ο κύριος ρόλος του συστήματος ρύθμισης στροφών της γεννήτριας, είναι η ρύθμιση των βαλβίδων εισαγωγής του στροβίλου προκειμένου να εξισωθεί η μηχανική του ροπή με την ηλεκτρική ροπή τη γεννήτριας. Ανάλογα με τη λειτουργία των μονάδων και τις απαιτήσεις ελέγχου, χρησιμοποιούνται δύο τύποι ελέγχου, ο τύπου «πτώσης» και ο τύπου «συχνότητας ή ισόχρονου (σταθερής ταχύτητας)». Ο έλεγχος τύπου πτώσης (ταχύτητα/φορτίο), συμπεριφέρεται με μία χαρακτηριστική, παρόμοια με αυτή όπου όταν αυξάνεται το φορτίο οι στροφές πέφτουν. Στις σύγχρονες μηχανές, η λειτουργία του ρυθμίζεται στη συχνότητα του συστήματος. Μ' αυτό τον τρόπο, στην ουσία ο ρυθμιστής στροφών τύπου πτώσης, γίνεται ένας ελεγκτής φορτίου. Με την αύξηση του φορτίου, δίνεται ένα σήμα από το ρυθμιστή στροφών ν' 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 και μοιράζεται με τις υπόλοιπες μονάδες, με αποτέλεσμα την καλύτερη ευστάθεια του Σ.Η.Ε.

Ο ισόχρονος (συχνότητας) τύπος ελέγχου του ρυθμιστή στροφών, χρησιμοποιείται για τη λειτουργία μονάδων οι οποίες είναι απομονωμένες από το σύστημα. Μ' αυτό τον έλεγχο, γίνεται ρύθμιση της συχνότητας σε μία τιμή αναφοράς. Σε περιπτώσεις όπως αυτές των νησιών, αυτός ο τύπος ελέγχου είναι σημαντικός, για να επιτευχθεί η τιμή της συχνότητας στην ονομαστική, ή κοντά σ' αυτήν. Στις περιπτώσεις όμως μεγάλων Σ.Η.Ε., όπου μία μόνο μονάδα έχει ελάχιστη επίδραση στη συχνότητα του δικτύου, ο πλέον χρησιμοποιούμενος τρόπος ελέγχου είναι ο τύπου πτώσης. [22]

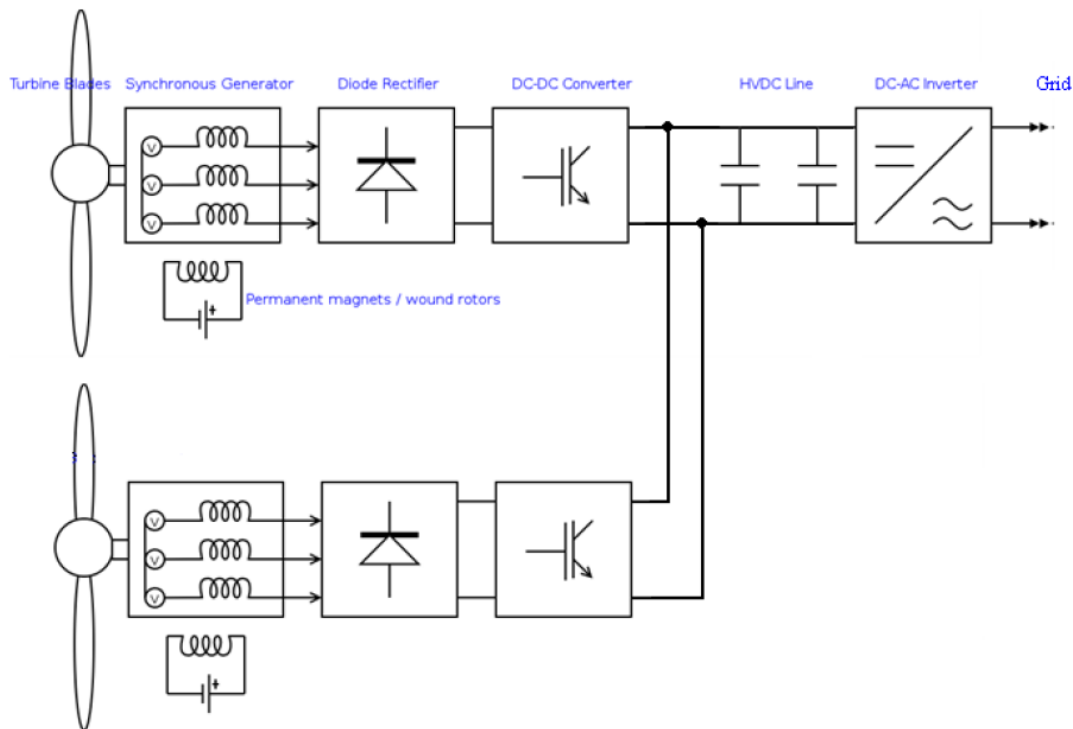
Κεφάλαιο 5ο

Εφαρμογές ελεγκτών τάσης και συχνότητας σε σύγχρονες γεννήτριες

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μεγάλη τεχνολογική πρόοδος στο κομμάτι των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η έξαρση που παρατηρείται είναι ένας λόγος που υπάρχουν μελέτες ευστάθειας και ελέγχου της ισχύος των γεννητριών που ενσωματώνονται σε αυτά τα συστήματα. Η μελέτη ελεγκτών τάσης και συχνότητας περιλαμβάνεται σε τέτοια συστήματα, κυρίως σε φωτοβολταϊκά και σε αιολικά συστήματα. Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα βασικά στοιχεία των ελέγχων σε αυτά τα συστήματα.

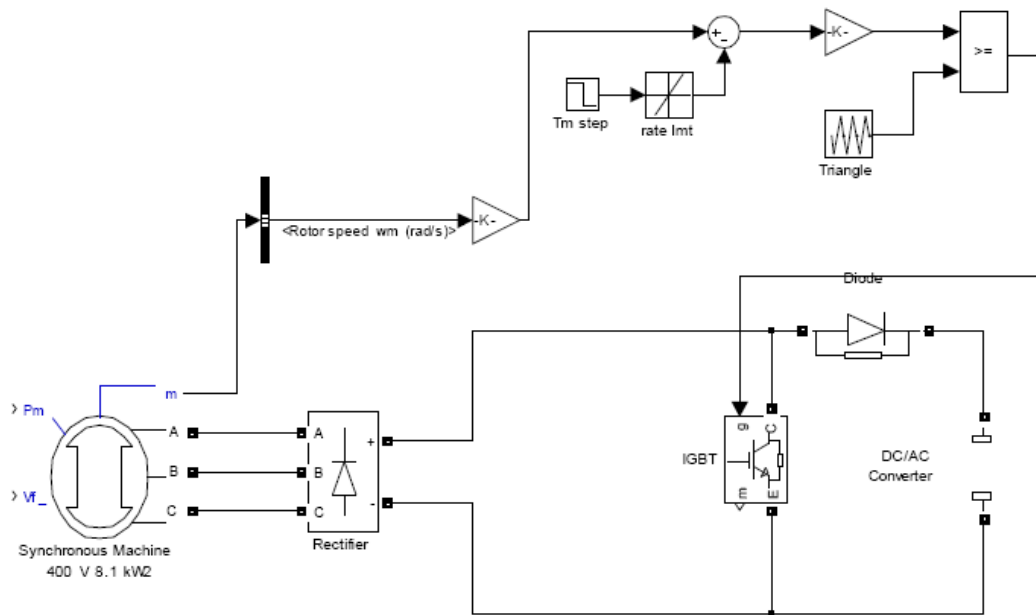
5.1. Εφαρμογές σε Αιολικά Συστήματα (Ανεμογεννήτριες)

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι ακροδέκτες της γεννήτριας συνδέονται με τον ανορθωτή διόδων. Στη συνέχεια συνδέεται ο μετατροπέας ανύψωσης, ο οποίος ανυψώνει την τάση σε ένα υψηλότερο επίπεδο. Σε αυτό το σημείο συνδέονται οι παράλληλοι κλάδοι του συστήματος. Ακολουθεί μια DC γραμμή μεταφοράς και ο αντιστροφέας σύνδεσης στο δίκτυο. Ο DC/AC αντιστροφέας, εκτός από την προφανή λειτουργία της μετατροπής από DC σε AC, είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί την DC τάση σταθερή. Εφόσον η τάση στην πλευρά υψηλής τάσης του μετατροπέα ανύψωσης διατηρείται σταθερή, μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος ταχύτητας με την αλλαγή του εύρους των παλμών του IGBT του μετατροπέα ανύψωσης, χρησιμοποιώντας την τεχνική PWM. Στην περίπτωση της μέγιστης απολαβής ισχύς, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ακολουθεί τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου. Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την ονομαστική, ο έλεγχος γωνίας των πτερυγίων (pitch-control) επενεργεί, ώστε τελικά ο δρομέας να στρέφεται με την ονομαστική ταχύτητα. Στην περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από την ονομαστική τιμή, η ταχύτητα του δρομέα προσαρμόζεται στη βέλτιστη μέσω του ελέγχου του εύρους των παλμών του IGBT του μετατροπέα ανύψωσης.



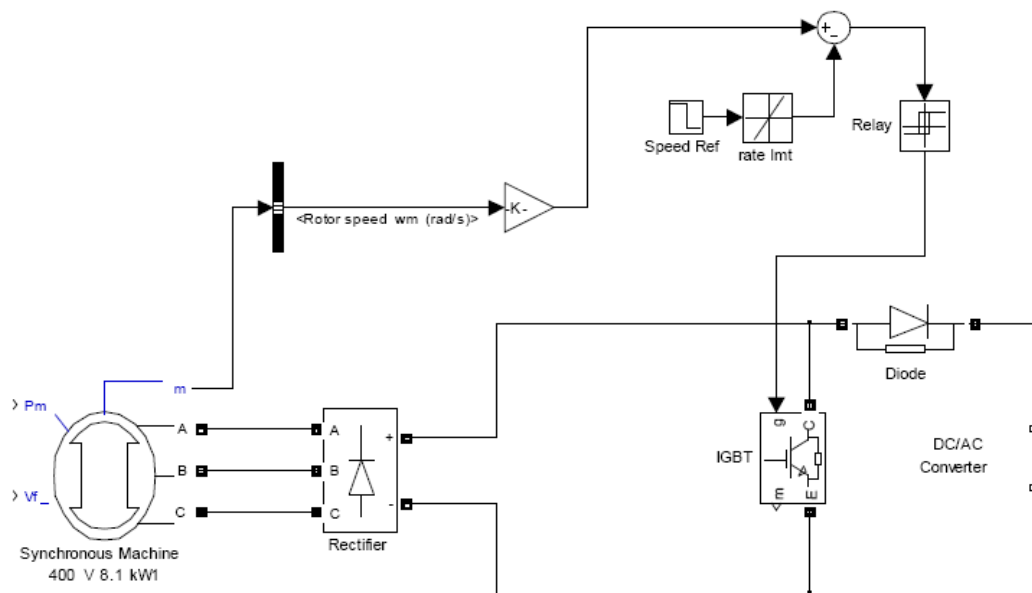
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα συστήματος ανεμογεννητριών [24]

Η πιο γνωστή μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας είναι μέσω της ρύθμιση του εύρους των παλμών (duty-cycle) του IGBT. Το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει έναν συγκριτή με την επιθυμητή αναφορά, ένα κέρδος, μια γεννήτρια τριγωνικών παλμών και έναν σχεσιακό τελεστή. Μια μέτρηση ταχύτητας λαμβάνεται από τη γεννήτρια και συγκρίνεται με την επιθυμητή αναφορά. Το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με το κέρδος και στη συνέχεια ακολουθεί η σύγκριση με τον τριγωνικό παλμό. Από το αποτέλεσμα αυτό προκύπτουν οι παλμοί για το IGBT του μετατροπέα ανύψωσης. Το εύρος των παλμών καθορίζει τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής. Όταν λαμβάνει μεγάλες τιμές, η ταχύτητα αυξάνεται, ενώ για μικρές τιμές μειώνεται. Οι συνεχείς εναλλαγές του εύρους των παλμών με το ρυθμό που καθορίζει η διακοπτική συχνότητα (2 kHz σε αυτή την περίπτωση) διατηρούν την ταχύτητα του δρομέα στην επιθυμητή ταχύτητα με ικανοποιητική ακρίβεια. Στο Σχ. 5.2 φαίνεται το σχεδιάγραμμα του ελέγχου της ταχύτητας με την τεχνική PWM.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα συστήματος ελέγχου ταχύτητας με την τεχνική PWM [24]

Μια άλλη μέθοδος είναι μέσω βρόγχου υστέρησης. Η διαφορά ανάμεσα σε αυτή τη μέθοδο και αυτή που παρουσιάστηκε προηγουμένα είναι ότι οι παλμοί δεν σχηματίζονται μετά από σύγκριση με κάποια τριγωνική παλμοσειρά, αλλά καθορίζονται από το πρόσημο του σφάλματος της ταχύτητας ως προς την επιθυμητή αναφορά. Για τον έλεγχο της συχνότητας, χρησιμοποιείται έλεγχος υστέρησης. Σε αυτή την περίπτωση, αντί η σύγκριση του σφάλματος της ταχύτητας να γίνεται με το 0, γίνεται με μια ζώνη γύρω από το μηδέν. Το εύρος της ζώνης καθορίζει τη διακοπτική συχνότητα του συστήματος. Οι παλμοί για το IGBT δημιουργούνται από ένα “Relay” μπλοκ, στο οποίο ρυθμίζονται οι δύο τιμές που σχηματίζουν τη ζώνη υστέρησης εκατέρωθεν του μηδενός. Έτσι, όταν η απόκλιση από την επιθυμητή ταχύτητα παίρνει τιμή μεγαλύτερη από το πάνω όριο της ζώνης, το IGBT αρχίζει να άγει, προκειμένου η ταχύτητα να μειωθεί, όπως έχει περιγραφεί νωρίτερα. Αντίθετα, όταν η απόκλιση γίνεται μικρότερη από την τιμή του κάτω ορίου της ζώνης, το IGBT σταματά να άγει, με αποτέλεσμα η ταχύτητα να αρχίσει να αυξάνεται ξανά. Έτσι, με τη συνεχή εναλλαγή ανάμεσα στις δύο καταστάσεις, επιτυγχάνεται ο έλεγχος ταχύτητας. Η ζώνη υστέρησης έχει επιλεγεί με τέτοιο τρόπο $[-0.01, 0.01]$ ώστε η διακοπτική συχνότητα να ισορροπεί κοντά στο 1 kHz. Στο Σχ. 5.3 φαίνεται το σχεδιάγραμμα του ελέγχου της ταχύτητας με την τεχνική υστέρησης.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα συστήματος ελέγχου ταχύτητας με την τεχνική υστέρησης [24]

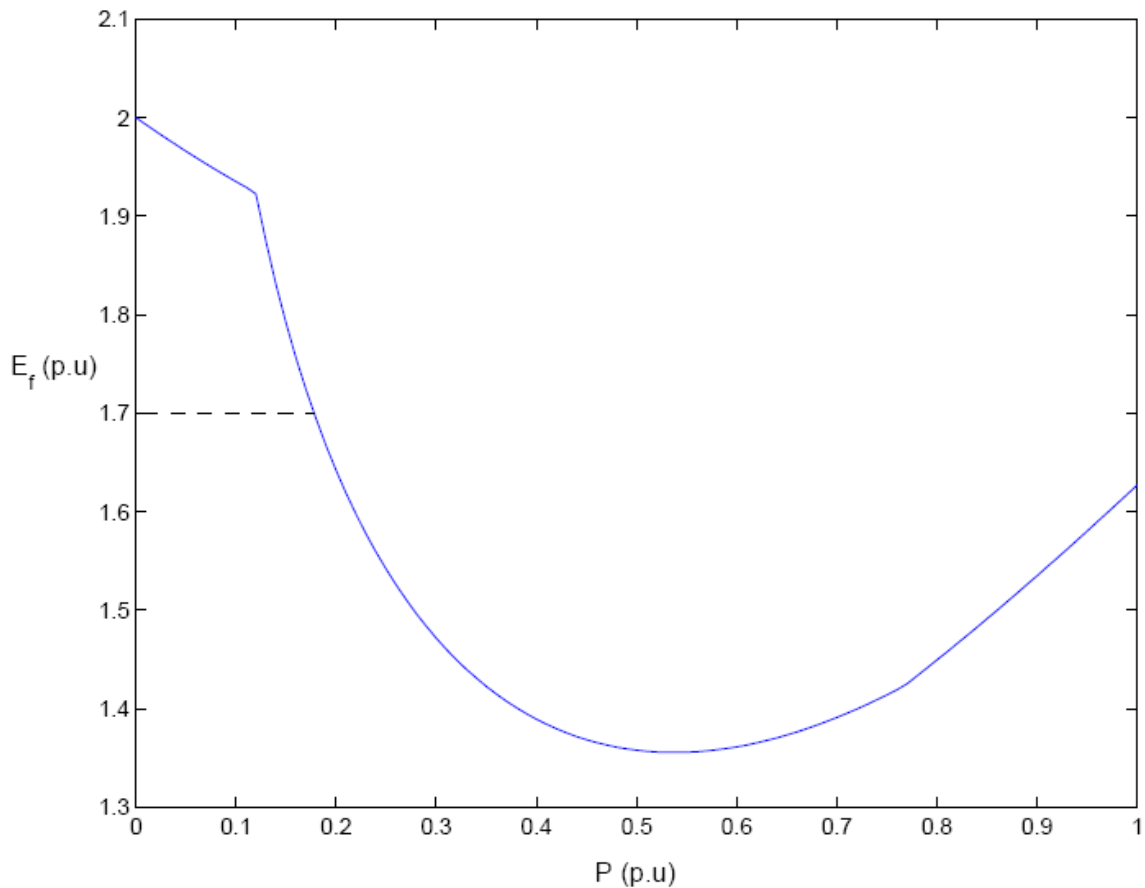
Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω για τον έλεγχο με PWM και με την τεχνική της υστέρησης, προκύπτει ότι τα δύο συστήματα έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες διαφορές, οι οποίες αποτελούν πλεονέκτημα για τη χρήση του ελέγχου υστέρησης.

i. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος κατά τη μείωση της ταχύτητας είναι κατά περίπου 30% μειωμένη στην περίπτωση του ελέγχου υστέρησης, σε σχέση με την τεχνική PWM. Στη μόνιμη κατάσταση, αυτό δεν έχει κάποιο αντίκτυπο στη λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, δεδομένου ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι μέγεθος μεταβαλλόμενο, οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος είναι κατά βάση δυναμικές. Έτσι, χαμηλότερες τιμές μέγιστου ρεύματος συνεπάγονται συνολικά χαμηλότερες απώλειες και αντίστοιχα χαμηλότερες καταπονήσεις για τη γεννήτρια.

ii. Η διακοπτική συχνότητα είναι μικρότερη στην περίπτωση του ελέγχου υστέρησης (1 kHz αντί 2kHz). Η χαμηλότερη διακοπτική συχνότητα συνεπάγεται γενικά χαμηλότερες απώλειες. Στις προσομοιώσεις που προηγήθηκαν βέβαια τα ρεύματα ήταν πολύ μικρά ώστε να προκληθούν αξιοσημείωτες διακοπτικές απώλειες. Για αυτόν ακριβώς το λόγο η απόδοση του συστήματος προκύπτει περίπου ίδια. Παρ' όλα αυτά, σε μεγαλύτερη κλίμακα, ο έλεγχος υστέρησης αναμένεται να εμφανίζει μικρότερες απώλειες [24]

5.1.1. Μέθοδοι ελέγχου ανεμογεννήτριας

Στην περίπτωση της μεταβλητής διέγερσης υπολογίζοντας την ονομαστική τάση στα άκρα της γεννήτριας (π.χ. $V=1$ α.μ.) η τιμή της διέγερσης E_f ως συνάρτηση της ενεργού ισχύος φαίνεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Καμπύλη τάσης διέγερσης – ενεργού ισχύος

Παρατηρώντας το σχήμα 5.4 φαίνεται ότι δεν υπάρχει μονότονη σχέση μεταξύ της τάσης διέγερσης και της ενεργού ισχύος. Πιο συγκεκριμένα για μικρές τιμές της ισχύος ($P < 0.53$ α.μ.) η κλίση της καμπύλης είναι αρνητική με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος να οδηγεί σε μείωση της τάσης διέγερσης. Αντίθετα για μεγάλες τιμές της ισχύος ($P > 0.53$ α.μ.) η κλίση της καμπύλης είναι θετική με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος να οδηγεί σε αύξηση της τάσης διέγερσης.

Ρύθμιση Τάσης Γεννήτριας με Α.Ρ.Τ.

Σε αυτή τη μέθοδο ελέγχου, το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να ελέγχει την τάση στα άκρα της μέσω ενός αυτόματου ρυθμιστή τάσης (Automatic Voltage Regulator, AVR), όπως συνηθίζεται στις κλασικές σύγχρονες γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Όμως, λόγω του ανορθωτή διόδων η τάση του πυκνωτή V_c ανάμεσα στον αντιστροφέα PWM και στον DC/DC μετατροπέα ανύψωσης είναι ανάλογη της τάσης V_s των ακροδεκτών της γεννήτριας ενώ στο α.μ. σύστημα οι τιμές τους ταυτίζονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το σύστημα διέγερσης να ελέγχει τελικά την DC τάση του πυκνωτή και να την κρατάει στην ονομαστική της τιμή (1 α.μ.).

Όσον αφορά στον αντιστροφέα PWM, που είναι από την πλευρά του δικτύου, αυτός εγγείει ενεργό ισχύ στο δίκτυο, ακολουθώντας την στρατηγική Μέγιστης Απολαβής Ισχύος, με μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής.

Τέλος, μοντελοποιείται και το σύστημα ελέγχου της γωνίας βήματος των πτερυγίων της Α/Γ για τον περιορισμό της ισχύος εξόδου στην ονομαστική της τιμή, για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής.

Ρύθμιση Ισχύος Μέσω της Διέγερσης

Σε αυτή τη μέθοδο ελέγχου, το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για να υλοποιεί την στρατηγική μέγιστης απολαβής ισχύος (MPT strategy). Πιο συγκεκριμένα έχοντας δεδομένη τη ταχύτητα του δρομέα, υπολογίζεται η βέλτιστη ενεργό ισχύ που πρέπει να παράγει η γεννήτρια. Στη συνέχεια με βάση την καμπύλη 5.4 υπολογίζεται ποιά πρέπει να είναι η κατάλληλη διέγερση για τη δεδομένη ενεργό ισχύ. Ο αντιστροφέας PWM μοντελοποιείται ώστε να κρατάει σταθερή την τάση εισόδου του ελέγχοντας την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από την DC πλευρά προς το δίκτυο.

Και σε αυτήν την περίπτωση το μοντέλο της Α/Γ διαθέτει σύστημα ελέγχου της γωνίας του βήματος των πτερυγίων της, για τον περιορισμό της ισχύος εξόδου στην ονομαστική της τιμή, για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής.

5.2. Εφαρμογές σε Συστήματα Κατανεμημένης Παραγωγής (Φωτοβολταϊκά Συστήματα)

5.2.1. Σύνδεση στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης και Μέσης Τάσης

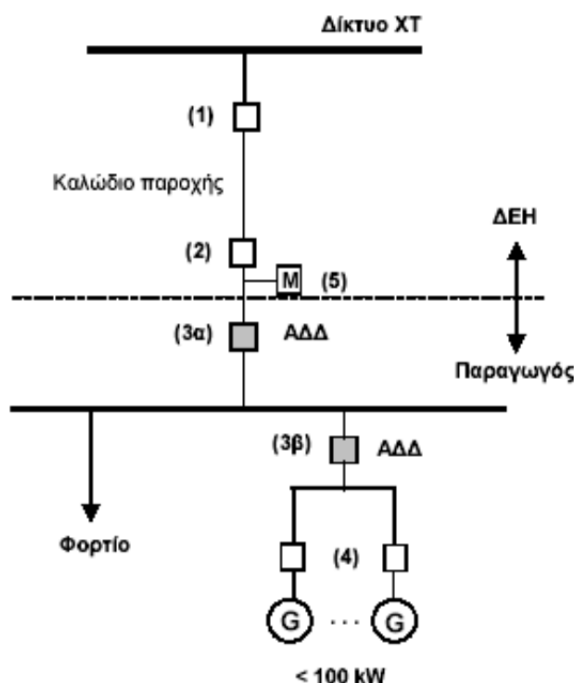
Στην περίπτωση της κατανεμημένης παραγωγής, στη βιβλιογραφία οι ελεγκτές τάσης και συχνότητας πάνω στα οποία λειτουργεί το σύστημα βρίσκονται στους Μετασχηματιστές Χαμηλής Τάσης/Μέσης Τάσης και ονομάζονται Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπο Φορτίο - ΣΑΤΥΦ. Φυσικά και οι γεννήτριες έχουν ενσωματωμένα – συνήθως- τους δικούς τους ελεγκτές αλλά το σύστημα διανομής βασίζεται κυρίως στα ΣΑΤΥΦ.

Οι μεγάλοι μετασχηματιστές στο σύστημα μεταφοράς συνήθως είναι εφοδιασμένοι με τα λεγόμενα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (under load tap changers , ULTC ή LTC) και ονομάζονται και μετασχηματιστές ρύθμισης. Τα ΣΑΤΥΦ είναι μηχανισμοί ενσωματωμένοι συνήθως στους μετασχηματιστές ισχύος στους ΥΣ ΧΤ/ΜΤ αλλά και σε ΥΣ ΜΤ/ΧΤ και οι μετασχηματιστές εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ έχουν τη δυνατότητα πέραν του να μετασχηματίζουν το επίπεδο της τάσης, να αλλάζουν και να ελέγχουν το λόγο μετασχηματισμού των τυλιγμάτων τους ενώ βρίσκονται σε λειτουργία και διακινούν ισχύ. Οι μετασχηματιστές ρύθμισης επομένως εκτελούν δύο λειτουργίες:

- Μετασχηματισμός επιπέδου τάσης
- Έλεγχος τάσης

Οι μετασχηματιστές στους ΥΣ ΧΤ/ΜΤ που είναι ενσωματωμένοι με ΣΑΤΥΦ είναι σημαντικοί διότι καθορίζουν την τάση στην αναχώρηση των δικτύων διανομής, γεγονός σημαντικό για την ποιότητα παροχής ισχύος προς τους καταναλωτές του δικτύου διανομής. Παραδείγματος χάρη σε περιόδους ισχυρής φόρτισης του δικτύου (αιχμές φόρτιου) η αυξημένη παροχή ενεργού και αέργου ισχύος από τη μεταφορά στη διανομή δημιουργεί πτώσεις τάσεως στα επίπεδα της μεταφοράς (λόγω των μεγάλων φορτίσεων των γραμμών και άρα σημαντικών άεργων απωλειών) που εάν οι λόγοι μετασχηματισμού των ΜΣ ΜΤ/ΧΤ διατηρούνταν στα ονομαστικά επίπεδα θα είχαμε σαν συνέπεια μία μη ανεκτή τάση στην αναχώρηση πολλών δικτύων διανομής με αποτέλεσμα η περαιτέρω διανομή ενεργού και αέργου ισχύος στα δίκτυα διανομής να δημιουργήσει επιπρόσθετες πτώσεις τάσης (σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ξεχωριστοί ρυθμιστές τάσης στους κορμούς διανομής) με αποτέλεσμα οι καταναλωτές να έχουν χαμηλές τάσεις (σε σχέση με τις ονομαστικές) στις κατοικίες τους και στις βιομηχανίες τους. Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα πιθανό να συμβαίνει οποτεδήποτε έχουμε αυξημένη φόρτιση στο δίκτυο και κατ' επέκταση ο μηχανισμός αλλαγής του λόγου μετασχηματισμού των μετασχηματιστών ισχύος

στους ΥΣ ΧΤ/ΜΤ είναι πάρα πολύ σημαντικός για την αποκατάσταση της τάσης στη διανομή. Ο μηχανισμός των ΑΣΤΥ αλλάζει τις ενεργές σπείρες ενός από τα δύο τριφασικά τυλίγματα του μετασχηματιστή ισχύος. Στο αποτέλεσμα είναι ότι ο λόγος μετασχηματισμού αλλάζει και επομένως η ελεγχόμενη τάση μετασχηματίζεται σε τιμή διαφορετικού μέτρου.



Σχήμα 5.5. Τυπική διάταξη σύνδεσης παραγωγού στο δίκτυο ΧΤ.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται μια τυπική διάταξη σύνδεσης παραγωγού στο δίκτυο ΧΤ.

Βασική απαίτηση για λόγους ασφάλειας είναι η ύπαρξη μέσων διακοπής (με ικανότητα διακοπής ρεύματος φορτίου) και ορατής απόζευξης, προσιτών ανά πάσα στιγμή στο προσωπικό της ΔΕΗ, ώστε να εξασφαλίζεται η απομόνωση του παραγωγού από το δίκτυο όταν αυτό απαιτείται από τη ΔΕΗ1. Η απαίτηση ορατής απόζευξης ικανοποιείται τόσο από το κιβώτιο σύνδεσης (1), όσο και από τις ασφάλειες της παροχής (2). Για εγκαταστάσεις μικρής ισχύος τα μέσα αυτά μπορούν σε έκτακτες περιπτώσεις να χρησιμοποιηθούν και για τη διακοπή της εγκατάστασης. Σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος είναι αναγκαία η ύπαρξη διακόπτη φορτίου ή ισχύος. Το μέσο διακοπής (3) είναι ο αυτόματος διακόπτης της διασύνδεσης (ΑΔΔ). Το δεύτερο στοιχείο πάνω στο οποίο στηρίζεται η ευστάθεια της τάσης σε τέτοια συστήματα είναι οι διακόπτες ΑΔΔ.

Για την προστασία της εγκατάστασης του παραγωγού, αλλά και άλλων συνδεδεμένων εγκαταστάσεων, απαιτείται η τοποθέτηση συστήματος προστασίας απόζευξης, το οποίο επενεργεί στον ΑΔΔ της εγκατάστασης παραγωγής και εξασφαλίζει την άμεση

απόξενξή της όταν εμφανιστούν ανεπίτρεπτες διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας.

Μέσω της προστασίας απόξενξης αποτρέπεται η νησιδοποίηση τμήματος του δικτύου που έχει απομονωθεί από το υπόλοιπο δίκτυο (π.χ. λόγω της λειτουργίας διακόπτη στα ανάντη της γραμμής ΜΤ όπου συνδέεται ο παραγωγός), τα φορτία του οποίου τροφοδοτούνται από την εγκατάσταση παραγωγής. Τέτοιες καταστάσεις απομονωμένης λειτουργίας μπορούν να προκαλέσουν την εμφάνιση σοβαρών υπερτάσεων (ιδιαίτερα στην περίπτωση ασύγχρονων γεννητριών).

Για τη σύνδεση των μονάδων παραγωγής με το δίκτυο της ΔΕΗ, ή με την υπόλοιπη εγκατάσταση, πρέπει να εγκατασταθεί διακόπτης με ικανότητα διακοπής τουλάχιστον ρεύματος φορτίου (διακόπτης ισχύος, ασφαλειοδιακόπτης φορτίου, επαφείας με ασφάλειες προστασίας έναντι βραχυκυκλωμάτων), ο οποίος εξασφαλίζει τον γαλβανικό διαχωρισμό όλων των φάσεων. Ο διακόπτης αυτός αναφέρεται ως Αυτόματος Διακόπτης Διασύνδεσης (ΑΔΔ). Ο ΑΔΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο διακόπτης που συνδέει την όλη εγκατάσταση με το δίκτυο (οπότε και είναι εγκατεστημένος στον Υ/Σ ζεύξης), ή διακόπτης που συνδέει τις εγκαταστάσεις παραγωγής με την υπόλοιπη εγκατάσταση. Ο ΑΔΔ μπορεί γενικά να βρίσκεται στην πλευρά ΜΤ ή ΧΤ. Σε εγκαταστάσεις που δεν διαθέτουν τη δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας, τον ρόλο του ΑΔΔ μπορεί να παίξει ο διακόπτης της γεννήτριας (ή των γεννητριών). Εάν προβλέπεται η δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας των εγκαταστάσεων, τότε ο ΑΔΔ εγκαθίσταται στο όριο των εγκαταστάσεων που λειτουργούν απομονωμένα και πρέπει να διαθέτει σύστημα συγχρονισμού ακριβείας για τον παραλληλισμό με το δίκτυο

Οι ασύγχρονες γεννήτριες είναι επιθυμητό να συνδέονται στο δίκτυο χωρίς τάση, με αριθμό στροφών μεταξύ 95% και 105% των σύγχρονων, κατά προτίμηση μέσω διάταξης ομαλής εκκίνησης. Για σύγχρονες γεννήτριες απαιτείται διάταξη συγχρονισμού η οποία εξασφαλίζει κατ' ελάχιστον τις παρακάτω συνθήκες συγχρονισμού:

Διαφορά τάσης $\Delta U < \pm 10 \%$

Διαφορά συχνότητας $\Delta f < \pm 0.5 \text{ Hz}$

Διαφορά φασικής γωνίας $\Delta \varphi < \pm 10^\circ$

5.2.2. Έλεγχος κατά το φαινόμενο της νησιδοποίησης

Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν μία γεννήτρια ή ένα σύνολο γεννητριών κατανεμημένης παραγωγής συνεχίζουν να τροφοδοτούν ένα τμήμα του δικτύου που έχει αποκοπεί από το κυρίως σύστημα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διακοπτική λειτουργία του συστήματος προστασίας, όπως στην περίπτωση του διακόπτη αυτόματης επαναφοράς ή στην περίπτωση που ένα σφάλμα στην κύρια γραμμή εκκαθαρίζεται από τον διακόπτη ισχύος που βρίσκεται στην αναχώρηση της γραμμής από τον υποσταθμό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η λειτουργία νησίδος δεν είναι επιθυμητή γιατί μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα ασφάλειας και ποιότητας ισχύος. Είναι πιθανόν, κατά την διάρκεια αυτής της λειτουργίας, το τμήμα του δικτύου που έχει αποκοπεί να παρουσιάσει μεγάλες διαταραχές στην τάση και την συχνότητα του. Επίσης, τα επίπεδα σφάλματος είναι διαφορετικά και αυτό προκαλεί λάθος λειτουργία των εγκατεστημένων συσκευών προστασίας, όπως υπάρχει πιθανότητα να λειτουργεί χωρίς γείωση κάτι που μπορεί να επιφέρει καταστροφές στον εξοπλισμό, τα φορτία και την μονάδα που το συντηρεί. Όταν η νησίδα δημιουργηθεί, θα υπάρχει διαφορά στο ισοζύγιο ισχύος, δηλαδή της ισχύος εξόδου της παραγωγής και του φορτίου της νησίδας. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι λιγότερο από την ονομαστική ισχύ της μονάδας, είναι πιθανόν να μπορεί η παραγωγή να συντηρήσει τη νησίδα. Για να αποτρέψει αυτή τη λειτουργία η μονάδα που λειτουργεί παράλληλα με το δίκτυο, πρέπει να μπορεί να την ανιχνεύσει και να αποσυνδεθεί έγκαιρα από αυτό. Η προστασία από την απώλεια δικτύου ή προστασία λειτουργίας νησίδος (loss of mains LOM) ή *antislanding protection* είναι από τα πιο σημαντικά ζητήματα στην προστασία δικτύων με κατανεμημένη παραγωγή και υπάρχουν πολλές βιβλιογραφικές αναφορές με προτεινόμενες λύσεις. Σε περιπτώσεις σφαλμάτων, η γρήγορη αποσύνδεση των μονάδων Κ.Π. έχει ως αποτέλεσμα να λειτουργεί το σχήμα προστασίας όπως ήταν πριν την εισαγωγή Κ.Π. και αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για να αποτραπεί η εξάπλωση των προβλημάτων. Οι ισχύοντες κανονισμοί επιβάλλουν την αποσύνδεση των μονάδων Κ.Π., σε περίπτωση δημιουργίας νησίδος. Οι μέθοδοι προστασίας διαπίστωσης ότι έγινε αποσύνδεση από το δίκτυο μπορεί να διακριθούν σε μεθόδους που χρησιμοποιούν επικοινωνιακή σύνδεση, παθητικές και ενεργητικές μεθόδους

Μέθοδοι με επικοινωνιακή σύνδεση.

Οι μέθοδοι που βασίζονται σε επικοινωνιακή σύνδεση εξαρτώνται από την μετάδοση σημάτων τόσο από τις μονάδες Κ.Π. και από το δίκτυο και θεωρούνται αρκετά πιο ακριβές από τις άλλες δύο κατηγορίες. Ωστόσο, έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα της δυναμικής συνεργασίας των ηλεκτρονόμων προστασίας, ώστε να αποτρέπονται μη απαραίτητες αποσυνδέσεις των μονάδων Κ.Π

Παθητικές μέθοδοι

Οι παθητικές μέθοδοι εξαρτώνται από την παρακολούθηση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου η οποία συγκρίνεται με μία τιμή αναφοράς.

Υπέρτασης/Υπότασης

Μία σαφής ένδειξη ότι η σύνδεση με το δίκτυο έχει χαθεί είναι η πολύ χαμηλή τάση. Αν υπάρχουν γεννήτριες που λειτουργούν χωρίς έλεγχο τότε η τάση, λόγω συντονισμού, μπορεί να αυξηθεί και να ξεπεράσει το ανώτατο όριο. Συνεπώς, η προστασία από την υπέρταση/υπόταση είναι μια απλή μέθοδος προστασίας από την απώλεια δικτύου, αλλά, όταν η νησίδα που έχει σχηματιστεί είναι μεγάλη τότε είναι συχνά αργή.

Υψηλής/χαμηλής συχνότητας

Μετά την απώλεια δικτύου η συχνότητα της νησίδος αλλάζει λόγω της διαφοράς στο ισοζύγιο πραγματικής ισχύος . $\Delta P = \sum P_{DG} - \sum P_L$

Συνεπώς, $\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P f_s}{2S_n H}$ και $\Delta f = \frac{\Delta P f_s}{2S_n H} \cdot t_i$

όπου:

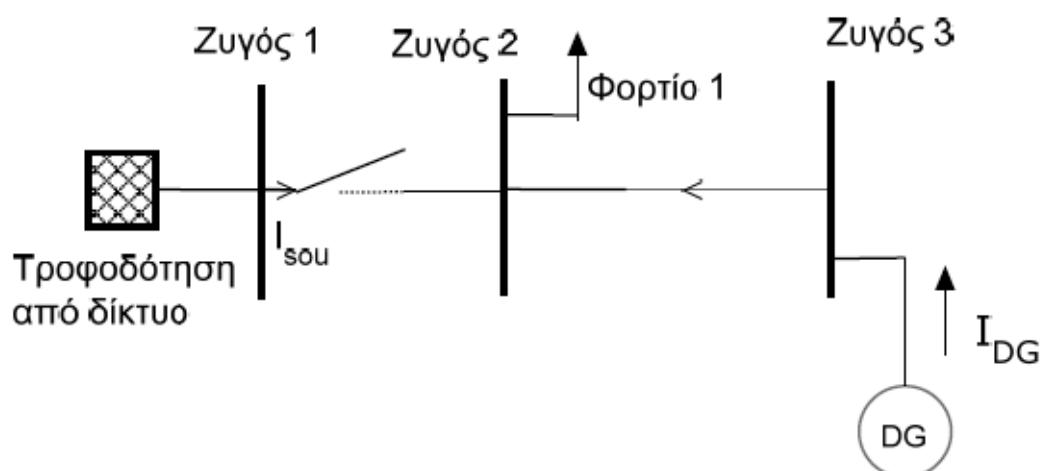
H είναι η σταθερά αδράνειας της μηχανής

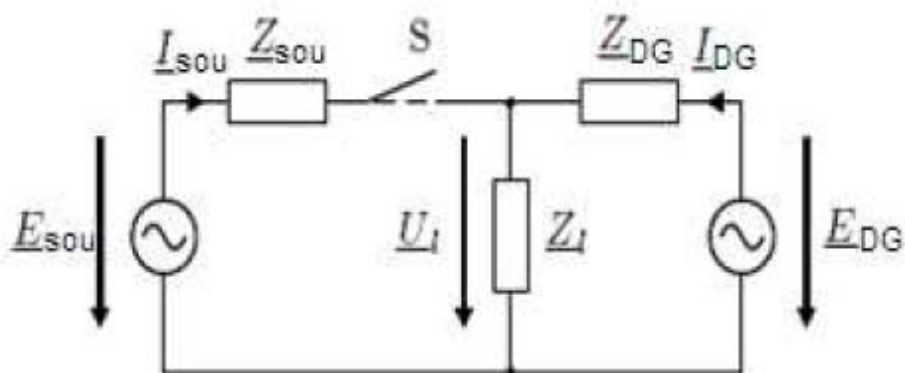
S η ονομαστική ισχύς της

f_s η συχνότητα πριν την λειτουργία νησίδος.

Η μέθοδος αυτή, όμως, επειδή η συχνότητα δεν αλλάζει στιγμιαία, είναι αργή.

Μεταβολής του διανύσματος τάσης





Σχήμα 5.7: Φαινόμενο της νησιδοποίησης

Στο Σχ.5.7 φαίνεται η στροφή του διανύσματος τάσης μετά την λειτουργία νησίδος, καθώς και το ισοδύναμο Thevenin του δικτύου και της γεννήτριας. Όταν ο διακόπτης S ανοίγει, το τοπικό φορτίο πρέπει να ικανοποιηθεί από την γεννήτρια G. Θεωρώντας ότι το φορτίο παραμένει σταθερής ισχύος. Στο πεδίο του χρόνου φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή η κατάσταση της παράλληλης λειτουργίας και με συνεχή η κατάσταση μετά την λειτουργία νησίδος. Ένας ηλεκτρονόμος διανύσματος τάσης παρακολουθεί την διάρκεια κάθε μισού κύκλου και διακόπτει όταν ένα συγκεκριμένο όριο ξεπεραστεί, όπου συνήθως θεπιλογή=6...12°

Ρυθμός μεταβολής της τάσης

Όταν ένα τμήμα του δικτύου διανομής απομονωθεί, τότε ο ρυθμός μεταβολής της τάσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος από την κανονική λειτουργία. Σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι ευαίσθητη σε διαταραχές του δικτύου που δεν σχετίζονται με την απώλεια δικτύου.

Ρυθμός μεταβολής της συχνότητας (Rate of change of frequency, ROCOF)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αλλαγή στην συχνότητα της νησίδος θα αλλάξει γρήγορα, εξαιτίας της ανισσοροπίας πραγματικής ισχύος. Ηλεκτρονόμοι που μετρούν το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας διακόπτουν με συνήθη επίπεδα επιλογής 0.1 με 1Hz/s. Αυτή η μέθοδος είναι ευαίσθητη στην διαταραχές του δικτύου και σε σφάλματα στο δίκτυο μεταφοράς.

Ρυθμός μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος.

Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί ερευνητικά, βασισμένες στο ρυθμό μεταβολής της ισχύος και του συντελεστή ισχύος. Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους με διάφορες

μεταβλητές του συστήματος, π.χ μετρώντας τον ρυθμό μεταβολής της τάσης και του συντελεστή ισχύος, ανιχνεύεται η απώλεια του δικτύου, χωρίς προβλήματα λόγω πιθανών διαταραχών.

Ενεργητικές μέθοδοι

Μέθοδος ένδειξης λάθους στην εξαγωγή άεργου ισχύος (Reactive Error Export)

Σ' αυτή τη μέθοδο η γεννήτρια ελέγχεται, ώστε να παρέχει στο δίκτυο συγκεκριμένο ποσό άεργου ισχύος. Αυτό, φυσικά, προϋποθέτει να έχει τη δυνατότητα η μονάδα να παρέχει στο σύστημα άεργο ισχύ. Όποτε συμβαίνει απώλεια δικτύου, η μονάδα δεν μπορεί να παρέχει στο δίκτυο τη συγκεκριμένη σταθερή τιμή της άεργου ισχύος που έχει προγραμματιστεί, καθώς δεν υπάρχει ταύτιση της τιμής με τις ανάγκες του φορτίου του δικτύου. Έτσι με αυτό τον τρόπο, δημιουργείται ένα σήμα λάθους, που είναι ένδειξη για την απώλεια δικτύου.

Μέθοδος παρακολούθησης της αντίστασης του συστήματος

Μετά την απώλεια δικτύου, η ισοδύναμη αντίσταση αυξάνεται σημαντικά σε ZDG και στον μετρητή υπάρχει σαφής ένδειξη για την απώλεια δικτύου

Μεταβολή της συχνότητας

Όπως είδαμε στην περίπτωση των παθητικών μεθόδων, ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας δίνει μία ένδειξη για την απώλεια δικτύου. Η λογική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και σε μονάδες ΚΠ, που διασυνδέονται με ηλεκτρονικό μετατροπέα, αλλά ενεργητικά. Το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα ελέγχεται, ώστε να είναι σε συχνότητα ελαφρά διαφορετική από την ονομαστική συχνότητα του συστήματος. Κάτω από κανονικές συνθήκες η συχνότητα καθορίζεται από το δίκτυο που είναι ισχυρό. Με την απώλεια δικτύου η συχνότητα μεταβάλλεται και αυτό δημιουργεί ένδειξη λάθους

Κεφάλαιο 6ο

Συμπεράσματα

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από πολλές διασυνδεδεμένες σύγχρονες γεννήτριες. Οι γεννήτριες αυτές παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια η οποία μέσω των γραμμών μεταφοράς καταλήγει στους καταναλωτές. Προκειμένου το σύστημα να λειτουργεί ομαλά οι γεννήτριες θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ τους σε συγχρονισμό, δηλαδή να περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Σε μια τέτοια περίπτωση η κατάσταση του συστήματος θεωρείται ευσταθής. Αντίθετα, αν έστω και μια γεννήτρια επιταχύνεται ή επιβραδύνεται πέρα από τη σύγχρονη ταχύτητα και οδηγείται σε αποσυγχρονισμό η κατάσταση του συστήματος θεωρείται ασταθής. Η μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος έγκειται στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα αντιδράσει σε μια διαταραχή. Βασικό στοιχείο της αντίδρασης του συστήματος είναι ο έλεγχος που θα κάνει προκειμένου να διαπιστώσει την ευστάθεια/αστάθεια. Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με αυτό το αντικείμενο και πιο συγκεκριμένα με τους ελεγκτές του συστήματος, δίνοντας έμφαση στους ελεγκτές τάσης και συχνότητας στις σύγχρονες γεννήτριες που λειτουργούν με αυτόματο τρόπο.

Η γενικευμένη χρήση της Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι πλέον ανάγκη του σύγχρονου πολιτισμού και αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους για την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μιας χώρας. Η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας στους εκάστοτε καταναλωτές επιτυγχάνεται μέσω του *Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας* (ΣΗΕ). Σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να μπορεί να παρέχει κάθε χρονική στιγμή την ποσότητα της ενέργειας η οποία ζητείται, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα σταθερή συχνότητα και τάση καθώς επίσης και αξιοπιστία τροφοδότησης. Επιπλέον, όλα αυτά θα πρέπει να τα επιτυγχάνει με το μικρότερο δυνατό οικονομικό κόστος ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις όποιες δυσμενείς για το περιβάλλον επιπτώσεις.

Στη βιβλιογραφία παρατηρούνται πολλές εφαρμογές ελεγκτών τάσης σε σύγχρονες γεννήτριες. Όμως η πλειοψηφία των ελεγκτών αυτών βρίσκονται ενσωματωμένοι στις διατάξεις ρύθμισης της τάσης. Έτσι έμμεσα, όταν γίνεται αναφορά στους ρυθμιστές τάσης, περιλαμβάνεται και ο έλεγχος της στάθμης της τάσης των γεννητριών. Η ρύθμιση και ο έλεγχος της τάσης απαιτούνται για να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της τάσης, αναγκαία προϋπόθεση για τη σύνδεση μιας γεννήτριας σε ένα ΣΗΕ. Παρόμοια αντιμετώπιση έχουν και οι ελεγκτές συχνότητας. Εμφανίζονται σαν τμήματα διατάξεων ρύθμισης και ελέγχου της ισχύος ή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα

της γεννήτριας και όχι σαν ξεχωριστές διατάξεις. Γενικότερα μπορούν να θεωρηθούν δύο μεγάλες ομάδες ελέγχων: του ρεύματος και της τάσης της γεννήτριας και της ισχύος που παράγει. Στην παρούσα εργασία έγιναν αναφορά στους σημαντικότερους ελεγκτές που περιλαμβάνει μια γεννήτρια.

Γενικότερα οι ελεγκτές ανήκουν στο Συστήματος Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ) που αποτελείται από τα υποτήματα του Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης (APT) και του Σταθεροποιητής Συστήματος Ισχύος (Power System Stabilizer).

Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης (APT) είναι η διάταξη ελέγχου, η οποία κρατάει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) την τερματική τάση της γεννήτριας. Η τάση διέγερσης της γεννήτριας δεν μπορεί να αυξάνεται απεριόριστα για να διατηρηθεί η τερματική τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Αν η φόρτιση της γεννήτριας είναι τέτοια ώστε ο APT να επιβάλλει πολύ υψηλές τιμές της τάσης διέγερσης, υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης στο τύλιγμα πεδίου και συνεπώς επιβάλλεται περιορισμός της στα ανώτατα ανεκτά επίπεδα. Ο ρόλος του Συστήματος Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ), είναι να μην επιτρέψει στον APT να αυξήσει την διέγερση της γεννήτριας πέραν των επιτρεπτών ορίων υπερθέρμανσης. Στην περίπτωση που κάποια από τις γεννήτριες φτάσει σε μέγιστο ρεύμα διέγερσης ενεργοποιείται μετά από μία χρονική καθυστέρηση ο περιοριστής ρεύματος διέγερσης

Ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος (Power System Stabilizer) είναι μία διάταξη η οποία επιδρά στο σύστημα διέγερσης μίας σύγχρονης γεννήτριας με σκοπό να παρέχει πρόσθετη ροπή απόσβεσης στις ταλαντώσεις του δρομέα της σε ένα επιθυμητό εύρος συχνοτήτων. Για το σκοπό αυτό, ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος παράγει στην έξοδό του μία συνιστώσα της ηλεκτρικής ροπής, η οποία είναι εν φάση με την απόκλιση της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας. Ο σταθεροποιητής συστήματος ισχύος λειτουργεί σταθεροποιητικά για τη γεννήτρια στη μεταβατική κατάσταση, αφήνοντας ανεπηρέαστη την τερματική της τάση στη μόνιμη κατάσταση. Σαν είσοδοι του σταθεροποιητή συστήματος ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σήματα ανάλογα είτε της ταχύτητας του δρομέα, είτε της συχνότητας εξόδου ή ακόμα της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας.

Οι τελευταίες βελτιώσεις στον τομέα των ελεγκτών αφορούν το σχεδιασμό μη γραμμικών ελεγκτών σε συστήματα για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι ενθαρρυντικά αφού παρατηρούνται καλύτερες αποδόσεις τόσο των μη γραμμικών ελεγκτών έναντι των συμβατικών αλλά και καλύτερες συμπεριφορές κατά την αστάθεια της τάσης ενός συστήματος. Το μειονέκτημα είναι το κόστος κατασκευής τους.

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μεγάλη τεχνολογική πρόοδος στο κομμάτι των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Έχουν γίνει πολλές μελέτες πάνω σε ζητήματα ευστάθειας και ελέγχου της ισχύος των γεννητριών που ενσωματώνονται σε αυτά τα

συστήματα. Ο λόγος είναι γιατί από την στιγμή που εισέρχονται στο δίκτυο διανομής ανεξάρτητοι παραγωγοί, πρέπει να διασφαλιστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος και της ασφάλειας των υπολοίπων παραγωγών. Η μελέτη ελεγκτών τάσης και συχνότητας περιλαμβάνεται σε τέτοια συστήματα, κυρίως σε φωτοβολταϊκά και σε αιολικά συστήματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, "Εισαγωγή στα ΣΗΕ", Αθήνα 2001.
2. Κ. Βουρνά, "Ευστάθεια Μονίμου Καταστάσεως", Αθήνα 2004
3. Μ. Ε. Καρυστιανός, "Βελτιστοποίηση Ορίων Μεταφοράς Ισχύος σε Συνθήκες Ασφάλειας Τάσεως", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Δεκέμβριος 2005
4. C. W. Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, 1994
5. Γ. Α. Μάνος, "Ανάλυση Φαινομένων Κατάρρευσης Τάσεως σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Απρίλιος 1998
6. C. D. Vournas, V. C. Nikolaidis, A. A. Tassoulis, "Experience from the Athens Blackout of July 12, 2004", Proceedings of 2005 IEEE St Petersburg Power Tech Conference, St Petersburg, Russia, June 27-30, 2005
7. P. Kundur, et al, "Definitions and Classification of Power System Stability", IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1387-1401, May 2004
8. T. Van Cutsem, C. D. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998
9. P. Kundur, "Power System Stability and Control", EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994
10. Ηλεκτρική Μηχανή:
http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%AE
11. Σημειώσεις Βιομηχανικοί αυτοματισμοί, TEI Σερρών:
http://chaos.c4lab.el.teithe.gr/kioskeridis/Industrial_Automation_02_DC_Machines.pdf
12. Γιαννακόπουλος Γαβριήλ, Βοβός Νικόλαος, 'Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας', Εκδόσεις Ζήτη, 2009
13. Μανουλίδης Π, "Πρόγραμμα Προσομοίωσης Ευστάθειας Τάσης και Μέτρων Προστασίας από Κατάρρευση", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2008
14. Ποταμιανάκης Ε, "Προσομοίωση Και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενεργείας Για Την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης", Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, 2006
15. H. F. Wang, "Modelling Multiple FACTS Devices Into Multi-Machine Power Systems and Applications", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 25, pp. 227-237, 2003
16. Y. Wang, H. Chen, R. Zhou, "A Nonlinear Controller Design for SVC to Improve Power System Voltage Stability", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 22, pp. 463-470, 2000
17. T. Van Cutsem, C. D. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998
18. IEEE Working Group on Computer Modeling of Excitation Systems, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE

- Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, No 2, pp 494-509, February 1981
19. J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, "Power System Dynamics and Stability", John Wiley and Sons, 1997
 20. Λιοτσος Θ, "Θεωρία Προστασίας Γεννητριών Και Προσδιορισμός Ρυθμίσεων Με Τη Μέθοδο Της Δυναμικής Προσομοίωσης", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2007
 21. T. Van Cutsem, C. D. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Springer, 2008
 22. Δημαράκης Ι, "Dynamic Study of a System consisting of two Terminal Boost controlled Synchronous Generators for Variable Speed Wind Turbines", ΕΜΠ, 2008