



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Λάσκαρης Ανδρέας του Κωνσταντίνου**

**Αριθμός Μητρώου: 2014030025**

**Θέμα**

**Ανάπτυξη λογισμικού για την ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας  
συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση αιολικών  
συστημάτων.**

**Software development for transient stability analysis of power electric systems  
with large wind penetration.**

**Χανιά, 2021**



Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων  
Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης στις  
3/12/2021

**Εξεταστική Επιτροπή**

Αναπληρωτής Καθηγητής Φώτιος Κανέλλος (Επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής Ευτύχιος Κουτρούλης

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρακάκης



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αφορά την υλοποίηση λογισμικού για τον υπολογισμό της μεταβατικής ευστάθειας σύγχρονων γεννητριών αλλά και μονάδων ανεμογεννητριών.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο παραδοσιακό δίκτυο ηλεκτροδότησης με μια αναφορά στις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Στη συνέχεια γίνεται επέκταση σε μονάδες ανεμογεννητριών με μια ιστορική ανάδρομη στη χρήση τους. Επιπλέον τοποθετείται και μια στατιστική ανάλυση που αναδεικνύει τη σημαντικότητα των μονάδων αυτών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η κατανομή της ταχύτητας του άνεμου τονίζοντας τη στοχαστική φύση του. Έπειτα γίνεται αναφορά στον τρόπο υπολογισμού της κατανομής του άνεμου με τη μέθοδο του Weibull. Τέλος η ανάλυση καταλήγει στις βασικές αρχές της θεωρίας πτέρωσης όπου και υπολογίζεται με καλή ακρίβεια η ισχύς που προσδίδει ο άνεμος πάνω στα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η θεωρία της λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών με μεγάλη έμφαση στις σύγχρονες γεννήτριες όπου διακρίνονται όλα τα χαρακτηριστικά και οι διαφοροποιήσεις των σύγχρονων μηχανών. Η ανάλυση επεκτείνεται στη χρήση του μετασχηματισμού Park με βάση την οποία γίνεται επέκταση στην επίλυση των εξισώσεων των σύγχρονων γεννητριών ηλεκτρικής διέγερσης και μονίμων μαγνητών αντίστοιχα. Μετά από την επίλυση των δύο τύπων σύγχρονης γεννήτριας αναλύεται η Ευστάθεια των σύγχρονων μηχανών σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, παρατείνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μιας σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης υπό τη λειτουργία της σαν συμβατική μονάδα παραγωγής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εισάγεται η γενική δομή μιας ανεμογεννήτριας με τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων της. Έπειτα γίνεται διαχωρισμός των επιμέρους συστημάτων με πρώτο από αυτά να αναλύεται το αεροδυναμικό σύστημα και η θεωρία της μεγίστης απολαβής ισχύος από τον άνεμο. Μετά από μια επιπλέον ανάλυση των σύγχρονων γεννητριών σε αιολικά συστήματα, η συνέχεια άφορα τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς που τοποθετούνται και τον τρόπο ελέγχου αυτών. Στο τέλος του κεφαλαίου προσομοιώνεται η απόκριση ενός αιολικού συστήματος σε φυσιολογικές συνθήκες, σε βυθίσεις τάσεις, ριπές άνεμου αλλά και βραχυκυκλώματα.

Το πέμπτο κεφάλαιο άφορα την περιγραφή ενός ηλεκτρικού δικτύου και την ανάλυση των ροών φορτίου σε αυτό. Αναφέρεται ξεχωριστά η μορφή της κάθε συνιστώσας του δικτύου και έπειτα ο τρόπος επίλυσης της ροής ισχύος σε αυτό. Το κεφάλαιο αυτό καταλήγει στη γενική μορφή των ζυγών και στους υπολογισμούς των τάσεων τους με τη χρήση των εξισώσεων ροών φορτίου.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται συνδυασμός των προηγούμενων κεφαλαίων με σκοπό την υλοποίηση λογισμικού το οποίο υπολογίζει τη μεταβατική ευστάθεια των μονάδων παραγωγής ενός δικτύου όταν σε αυτό εφαρμόζονται ακραίες συνθήκες (ριπές άνεμου, απότομη αύξηση ζήτησης ισχύος, βραχυκυκλώματα κ. α.). Στην αρχή αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των

στοιχείων του λογισμικού. Έπειτα αναλύεται η μέθοδος υπολογισμού της ροής φορτίου πάνω σε δεδομένο ηλεκτρικό δίκτυο. Στο σημείο αυτό τοποθετείται η μέθοδος υπολογισμού η οποία είναι η Gauss με την επέκταση της Gauss-Seidel. Μετά, ακολουθεί μια σύντομη εξήγηση της ροής των υπολογισμών και εξηγείται αναλυτικά ο τρόπος επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα κεφάλαια της εργασίας. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται τα αποτελέσματα του λογισμικού για την ανάλυση ενός ηλεκτρικού δικτύου έξι ζυγών στο οποίο είναι συνδεδεμένα όλα τα πιθανά συστήματα.

Τέλος παρατίθενται τα τελικά συμπεράσματα και οι πιθανές επεκτάσεις του παρόντος λογισμικού.

## **ABSTRACT**

This work concerns the implementation of software for the transient stability analysis of power electric systems with high wind penetration. The first chapter is an introduction to the traditional power grid with a reference to conventional generating units. It is then expanded to wind turbine units with a historical background in their use. In addition, a statistical analysis is placed that highlights the importance of these units. The second chapter analyzes the distribution of wind speed, emphasizing its contemplative nature. What refers next is the way of calculating the wind distribution with the Weibull method. Finally, the analysis ends with the basic principles of the theory of flotation where the power given by the wind on the blades of a wind turbine is calculated with good accuracy. In the third chapter the theory of the operation of electric motors is developed with great emphasis on modern generators where all the features and differentiations of modern motors are distinguished. The analysis extends to the use of the Park transform, which extends to solving the equations of synchronous electrical excitation generators and permanent magnet, respectively. After the solution of the two types of synchronous generators, the Stability of synchronous machines in electricity systems is analyzed. Finally, the results of the simulation of a synchronous electrically excited generator under its operation as a conventional production unit are presented. The fourth chapter introduces the general structure of a wind turbine with the basic technical characteristics of its systems. Then the individual systems are separated with the first of them analyzing the aerodynamic system and the theory of maximum power point tracking from the wind. After an additional analysis of modern generators in wind systems, the continuation concerns the electronic converters that are installed and how to control them. At the end of the chapter, the response of a wind system is simulated in normal conditions, in sinking voltages, gusts of wind and short circuits. The fifth chapter deals with the description of an electrical network and the power flow analysis in it. The form of each component of the network is mentioned separately along with the way of resolving the power flow in each one of them. Meaning that this chapter deals with the general form of scales and their voltage calculations using power flow equations. In the sixth and last chapter, the previous chapters are combined in order to implement a software that calculates the transient stability of the production units of a network when extreme conditions are applied to it (wind gusts, sharp increase in power demand, short circuits, etc.). The characteristics of the software components are listed at the beginning. Then the method of calculating the load flow on a given electrical network is analyzed. At this point, the calculation method Gauss with the Gauss-Seidel extension are described. Next to it, there is a good analysis of the differential equation solving method that applied to every chapter of this thesis. At the end of this chapter there is a simulation of how each system reacts to various extreme conditions like the ones described before but with the extension that all systems are connected to a theoretical grid so that each system can affect the other. Finally, the final conclusions and possible future extensions for this software are presented.





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμα τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Φώτιο Κανέλλο για τη πολύτιμη βοήθεια του, τη γνώση που μου προσέφερε πάνω στο αντικείμενο αλλά και όλα τα εφόδια που μου παρείχε για την εκμάθηση των αντικειμένων της εργασίας και όχι μόνο. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές της επιτροπής για την εξίσου πολύτιμη διδασκαλία τους στα ακαδημαϊκά έτη της σχολής. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ και στους ανθρώπους στο φιλικό και οικογενειακό μου κύκλο για την συμπαράσταση τους.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	5
Κατάλογος σχημάτων.....	13
Κατάλογος Πινάκων .....	16
1 Εισαγωγή .....	1
1.1 Εισαγωγή – Το παραδοσιακό Δίκτυο Ηλεκτροδότησης .....	1
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	1
1.3 Άνεμογεννήτριες – Ιστορική αναδρομή και στατιστικά .....	3
2 Μοντελοποίηση Ανέμου .....	5
2.1 Κατανομή ταχύτητας ανέμου.....	5
2.2 Κατανομή WEIBULL .....	6
2.3 Θεωρία Πτέρωσης .....	6
3 Ηλεκτρικές Μηχανές - Η Σύγχρονη Μηχανή .....	9
3.1 Εισαγωγή – Ηλεκτρικές Μηχανές .....	9
3.2 Η σύγχρονη Ηλεκτρική Μηχανή .....	9
3.3 Μετασχηματισμός Park.....	13
3.4 Η Σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης με τη χρήση του μετασχηματισμού Park .....	16
3.5 Η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών με τη χρήση του μετασχηματισμού Park.....	20
3.6 Ευστάθεια σύγχρονων γεννητριών σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας .....	21
3.7 Συμπεράσματα.....	32
4 Ανεμογεννήτρια με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών. Έλεγχος και ευστάθεια .....	33
4.1 Εισαγωγή στα χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών .....	33
4.2 Αεροδυναμικό σύστημα ανεμογεννήτριας – Μέγιστη απολαβή ισχύος .....	34
4.3 Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών σε σύστημα ανεμογεννήτριας.....	36
4.4 Ηλεκτρονικά ισχύος σε αιολικά συστήματα παραγωγής .....	37
4.5 Μετατροπείς ισχύος στη πλευρά της μηχανής και του δικτύου. ....	40
4.6 Προσομοίωση της μεταβατικής ευστάθειας αιολικών συστημάτων .....	47
4.7 Ευστάθεια και αντοχή αιολικών συστημάτων .....	50
5 Ηλεκτρικό δίκτυο – Μελέτη ροών φορτίου .....	55
5.1 Εισαγωγή .....	55
5.2 Συνιστώσες συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας .....	55
5.2.1 Παράσταση μονάδων παραγωγής.....	56

5.2.2	Γραμμές Μεταφοράς.....	57
5.2.3	Μετασηματιστές.....	58
5.2.4	Εγκάρσιοι πυκνωτές και πηνία .....	58
5.2.5	Φορτία.....	59
5.3	Εξισώσεις ροών φορτίου .....	59
5.4	Ζυγοί ροής φορτίου .....	61
6	Λογισμικό υπολογισμού μεταβατικής ευστάθειας ηλεκτρικών συστημάτων .....	63
6.1	Εισαγωγή - Στοιχεία Λογισμικού .....	63
6.2	Μέθοδος υπολογισμού ροών φορτίου.....	63
6.3	Λειτουργία λογισμικού .....	65
6.4	Επίλυση διαφορικών εξισώσεων.....	71
6.5	Επίλυση συστήματος έξι ζυγών .....	72
6.5.1	Προσομοίωση αποτελεσμάτων για απότομη αύξηση της απαιτούμενης παραγωγής απο τη συμβατική μονάδα.....	74
6.5.2	Προσομοίωση αποτελεσμάτων για απότομη αύξηση του ανέμου στα αιολικά πάρκα.....	77
6.5.3	Προσομοίωση αποτελεσμάτων για μεγάλη πτώση τάσης στο ζυγο 6.....	80
7	Συμπεράσματα και εξέλιξη του λογισμικού .....	83
7.1	Τελικά συμπεράσματα .....	83
7.2	Εξέλιξη του λογισμικού .....	83
8	Βιβλιογραφία .....	85

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1.1 Συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα σε <b>MW</b> ανεμογεννητριών. Σύμφωνα με τη <b>Wind Energy International</b> [4].....	3
Εικόνα 1.2 Εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών από το 1980 έως και μελλοντικά [5]. ....	4
Εικόνα 2.1 Αεροδυναμικός συντελεστής $C_p$ για τις διάφορες γωνίες 'b' και ισχύς ανέμου για ταχύτητες έως 20 m/s. ....	7
Εικόνα 3.1 Στάτης ηλεκτρικής μηχανής [13]. ....	10
Εικόνα 3.2 Κυλινδρικός δρομέας σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης [14]. ....	11
Εικόνα 3.3 Πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών [15]. ....	11
Εικόνα 3.4 Δρομέας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας με εκτύπους πόλους [16]. ....	12
Εικόνα 3.5 Κυλινδρικός δρομέας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας [16]. ....	12
Εικόνα 3.6 Συμμετρικό τριφασικό μονέλο ποσοτήτων a,b,c με τις συνιστώσες του μετασχηματισμού Park d,q. Παρατηρούμε πως σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας δεν υπάρχει.....	14
Εικόνα 3.7 Προσομοίωση των τιμών των d,q,ο συνιστωσών του στρεφόμενου πλαισίου του μετασχηματισμού Park για συμμετρικό ίσου πλάτους και ασύμμετρο άνισου πλάτους τριφασικό σύστημα, .....	15
Εικόνα 3.8 Αναπαράσταση σύγχρονης μηχανής με συγκεντρωμένα τυλίγματα.....	16
Εικόνα 3.9 Ανά φάση ισοδύναμο και διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης. ....	19
Εικόνα 3.10 Ανά φάση ισοδύναμο και διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών[10].....	21
Εικόνα 3.11 Συνιστώσες τάσεων και ρεύματων στο dq0 στρεφόμενο πλαίσιο του μετασχηματισμού Park... ..	24
Εικόνα 3.12 Γωνία ισχύος 'δ' και γωνίακη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ανα μονάδα .....	24
Εικόνα 3.13 Ανά μονάδα Ενεργός και Άεργος παραγόμενη ισχύς που απορροφά το φορτίο. ....	25
Εικόνα 3.14 Γωνία ισχύος και παραγόμενη ενεργος ισχύς της γεννήτριας κατά την αύξηση της μηχανικής ισχύος στον άξονα της.....	26
Εικόνα 3.15 Ρεύματα στάτη στο στρεφόμενο πλαίσιο του μετασχηματισμού Park και γωνιακή ταχύτητα δρομέα σύγχρονης γεννήτριας κατά την απότομη αύξηση της μηχανικής ισχύος στον άξονα της. ....	26
Εικόνα 3.16 Γωνιακή ταχύτητα σύγχρονης γεννήτριας και γωνία ισχύος 'δ'. ....	27
Εικόνα 3.17 Ρεύματα στάτη και παραγόμενη ενεργός ισχύς σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης. ...	27
Εικόνα 3.18 Μεταβολή του διανύσματος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης κατά την άυξηση του ρεύματος πεδίου. ....	28
Εικόνα 3.19 Ρεύματα και γωνία ισχύος 'δ' της γεννήτριας έπειτα από μονοφασικό βραχυκύκλωμα μηδενιμού τάσης στη φάση 'α' του στάτη της γεννήτριας. ....	28
Εικόνα 3.20 Ενεργος ισχύς στατη και γωνίακη ταχύτητα δρομέα της γεννήτριας μετα το βραχυκυκλωμα. ....	29
Εικόνα 3.21 Ρεύματα και γωνία ισχύος 'δ' της γεννήτριας έπειτα από πτώση τάσης κατά 10kV σεόλες τις φάσεις του στάτη. ....	29
Εικόνα 3.22 Ενεργός ισχύς και γωνίακη ταχύτητα της γεννήτριας έπειτα από πτώση τάσης κατά 10kV στις φάσεις του στάτη. ....	30
Εικόνα 3.23 Απλοποιημένο σύστημα Exciter σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης[12]. ....	30
Εικόνα 3.24 Απλοποιημένο σύστημα Governor σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης[12].....	30
Εικόνα 3.25 Ρεύματα και ενεργός ισχύς σύγχρονης μηχανής σε περίπτωση αποσυγχρονισμού. ....	31
Εικόνα 3.26 Ταχύτητα δρομέα και δωνία ισχύος 'δ' σε περίπτωση αποσυγχρονισμού. ....	32
Εικόνα 4.1 Γενικό σύστημα ανεμογεννήτριας [17].....	33

Εικόνα 4.2 Περιοχές λειτουργίας ανεμογεννήτριας. Περιοχές εκκίνησης (κιτρινο), βελτιστοποίησης,(πράσινο), περιορισμού (πορτοκαλί), απόκοπης(κόκκινο). ....	34
Εικόνα 4.3 . Εξάρτηση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τις διάφορες γωνίες βήματος ακροπερυγίου συναρτήσει του λόγου ακροπερυγίου. ....	35
Εικόνα 4.4 Σύστημα αυτομάτου ελέγχου για τη ρύθμιση της γωνίας βήματος περυγίου μέσω υδραυλικού συστήματος. ....	36
Εικόνα 4.5 Μετατροπείας ισχύος. Ανορθωτής-Πυκνωτής-Αντιστροφείας. ....	37
Εικόνα 4.6 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου <b>PWM</b> . ....	38
Εικόνα 4.7 Σχηματική επεξήγηση της μεθόδου <b>PWM</b> σε τριφασικό αντιστροφή. ....	39
Εικόνα 4.8 <b>PWM</b> ανορθωτής σε συνδυασμό με τριφασικά τυλίγματα και πυκνωτή ομαλοποίησης της εξόδου. .....	40
Εικόνα 4.9 <b>PWM</b> αντιστροφείας στη πλευρά του δικτύου. Τα παραλληλόγραμμα συμβολίζουν τις σύνθετες αντιστάσεις των φίλτρων εξόδου προς το δίκτυο. ....	40
Εικόνα 4.10 Έξοδος Α φάσης τριφασικού αντιστροφείας με τροφοδότηση <b>PWM</b> . ....	41
Εικόνα 4.11 Σύστημα ανεμογεννητριας στη πλευρά της μηχανής. ....	43
Εικόνα 4.12 Περιγραφή της ροής που ακολουθεί ο ελεγκτής στη πλευρά της μηχανής σε συγχρονισμό με τον έλεγχο της γωνίας pitch. ....	44
Εικόνα 4.13 Σύστημα ανεμογεννήτριας στη πλευρά του δικτύου. ....	46
Εικόνα 4.14 Πλήρες Απλοποιημένο σύστημα ανεμογεννήτριας. ....	46
Εικόνα 4.15 Ταχύτητα ανέμου (αριστερά) και συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος μαζί με τη μεταβολή της γωνίας pitch (αριστερά). ....	48
Εικόνα 4.16 Γωνιακή ταχύτητα δρομέα και ρεύματα στάτη. ....	48
Εικόνα 4.17 Ενεργός και Άεργος Ισχύς που παράγεται από τη σύγχρονη μηχανή. ....	49
Εικόνα 4.18 Τάση του πυκνωτή της <b>DC</b> διασύνδεσης. ....	49
Εικόνα 4.19 Προσδιωμένη στο δίκτυο Ενεργός και Άεργος ισχύς. ....	50
Εικόνα 4.20 Πτώση τάσης σε σύστημα ανεμογεννήτριας σε συνθήκες σταθερού ανέμου. ....	51
Εικόνα 4.21 Ενεργός και άεργος ισχύς που εισέρχεται στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της πτώσης τάσης. ....	51
Εικόνα 4.22 Απόκριση <b>DC</b> διασύνδεσης και ρεύματα του μετατρεπέα στη πλευρά του δικτύου κατά τη διάρκεια της πτώσης τάσης. ....	52
Εικόνα 4.23 Ρεύματα και ενεργός ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας το συστήματος. ....	52
Εικόνα 4.24 Ταχύτητα ανέμου και τάση δικτύου κατά τη διάρκεια μονοφασικού βραχυκυκλώματος. ....	53
Εικόνα 4.25 Ενεργός και Άεργος Ισχύς που προσδίδεται στο δίκτυο. ....	53
Εικόνα 4.26 Τάση στη <b>DC</b> διασύνδεση και ρεύματα του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου. ....	54
Εικόνα 4.27 Ρεύματα στάτη σύγχρονης γεννήτριας και Ενεργός Ισχύς που αυτή αποδίδει. ....	54
Εικόνα 5.1 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους. ....	57
Εικόνα 5.2 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή για μελέτη ροών φορτίου. ....	58
Εικόνα 5.3 Εγκάρσια στοιχεία. ....	58
Εικόνα 5.4 Φορτίο σταθερής ισχύος (αριστερά) και φορτίο σταθερής αγωγιμότητας (δεξιά). ....	59
Εικόνα 5.5 Γενικευμένη μορφή ζυγού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. ....	60
Εικόνα 6.1 Ροή λογισμικού ροών ισχύος. ....	66
Εικόνα 6.2. Διάγραμμα ροής του κώδικα για τη κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων. ....	68
Εικόνα 6.3 Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό των τάσεων κατά την ανάλυση ροών φορτίου. ....	70
Εικόνα 6.4 Ηλεκτρικό σύστημα έξι ζυγών. ....	73
Εικόνα 6.5 Γωνιακή ταχύτητα και γωνία ισχύος 'δ' της σύγχρονης γεννήτριας στο ζυγό 3. ....	74
Εικόνα 6.6 Ρεύματα και παραγόμενη ενεργός ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας στο ζυγό 3. ....	74

Εικόνα 6.7 Γωνία pitch και γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων της κάθε ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο του ζυγού 5.....	75
Εικόνα 6.8 Ρεύματα στάτη της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών και τάση του πυκνωτή στη DC διασύνδεση στη κάθε μονάδα ανεμογεννήτριας του ζυγού 5.....	75
Εικόνα 6.9 Ρεύματα μαζί με την ενεργό και την αεργο ισχύ που εκχύνονται στο δίκτυο απο τη κάθε ανεμογεννήτρια του ζυγού 5. ....	76
Εικόνα 6.10 Τάσεις και γωνίες τάσεων στους ζυγούς του συστήματος. ....	76
Εικόνα 6.11 Ρεύματα και γωνιακή ταχύτητα της σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης στο ζυγό 3.....	77
Εικόνα 6.12 Γωνία ισχύος 'δ' και παραγόμενη ενεργός ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης στο ζυγό 3.....	77
Εικόνα 6.13 Γωνία pitch και γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων της κάθε ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο του ζυγού 5.....	78
Εικόνα 6.14 Ρεύματα στάτη της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών και τάση του πυκνωτή στη DC διασύνδεση στη κάθε μονάδα ανεμογεννήτριας του ζυγού 5.....	78
Εικόνα 6.15 Ρεύματα μαζί με την ενεργό και την αεργο ισχύ που εκχύνονται στο δίκτυο απο τη κάθε ανεμογεννήτρια του ζυγού 5. ....	79
Εικόνα 6.16 Τάσεις και γωνίες τάσεων στους ζυγούς του συστήματος. ....	79
Εικόνα 6.17 Γωνιακή ταχύτητα και γωνία ισχύος 'δ' της σύγχρονης γεννήτριας στο ζυγό 3. ....	80
Εικόνα 6.18 Ρεύματα και παραγόμενη ενεργός ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας στο ζυγό 3. ....	80
Εικόνα 6.19 Γωνία pitch και γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων της κάθε ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο του ζυγού 5.....	81
Εικόνα 6.20 Ρεύματα στάτη της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών και τάση του πυκνωτή στη DC διασύνδεση στη κάθε μονάδα ανεμογεννήτριας του ζυγού 5.....	81
Εικόνα 6.21 Ρεύματα μαζί με την ενεργό και την αεργο ισχύ που εκχύνονται στο δίκτυο απο τη κάθε ανεμογεννήτρια του ζυγού 5. ....	82
Εικόνα 6.22 Τάσεις και γωνίες τάσεων στους ζυγούς του συστήματος. ....	82

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας .....	47
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά Σύγχρονης Γεννήτριας Μινίμων Μαγνητών. ....	47
Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά Φίλτρων και Δίκτυου.....	47



## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΤΟ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΟΤΗΣΗΣ

Ήδη από τα αρχαία χρόνια ο άνθρωπος είχε κάποια περιορισμένη εντριβή με την ύπαρξη του ηλεκτρισμού κυρίως λόγω χημικών αντιδράσεων. Υστερότερα οι έρευνες αναπτύχθηκαν λίγο περισσότερο γύρω από τη παρατήρηση μαγνητικών φαινομένων από πρωτοπόρους ερευνητές ενώ μετά το 1800 έγιναν σημαντικές νέες ανακαλύψεις. Οι ανακαλύψεις αυτές αφορούσαν τη γενική εκμετάλευση της ηλεκτρικής ενέργειας από διάφορους τομείς με κύρια χρήση αυτή του φωτισμού. Αξιοσημείωτη αναφορά έχει το πρώτο πλήρες σύστημα ηλεκτροδότησης το οποίο εγκαταστάθηκε από τον Thomas Edison στη πόλη της Νέας Υόρκης για τη παροχή φωτισμού. Το σύστημα αυτό αποτέλεσε την αρχή της οικουμενικής χρήσης του ηλεκτρισμού. Στις μέρες μας η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας σε σημείο που τη καθιστά μια βασική ανάγκη του ανθρώπου.

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια και η ανάγκη για λιγότερο ρυπογόνες μορφές παραγωγής ηλεκτρισμού αποτέλεσαν το κύριο έμβλημα για την ανάπτυξη τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παραδοσιακά το δίκτυο ηλεκτροδότησης αποτελείται από σταθμούς παραγωγής το δίκτυο μεταφοράς και τους καταναλωτές. Οι σταθμοί παραγωγής συνήθως καταναλώνουν μια μορφή καύσιμου με σκοπό την μετατροπή της χημικής ενέργειας σε κινητική και έπειτα σε ηλεκτρική. Οι μονάδες αυτού το είδους υπάγονται στις συμβατικές μονάδες παραγωγής με τη κύρια μετατροπή ενέργειας από στροβιλογεννήτριες. Τμήμα αυτών περιστρέφεται με τη χρήση ατμού υψηλής πίεσης. Από την υψηλή πίεση των υδρατμών παράγεται η απαραίτητη κινητική ενέργεια για τη κίνηση των κινούμενων μελών μιας γεννήτριας η οποία με τη σειρά της θα παράξει ηλεκτρισμό. Οι χημικές διαδικασίες παραγωγής θερμότητας μπορεί να είναι η καύση υδρογονανθράκων ή βιομάζας και η πυρηνική ενέργεια.

### 1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Είναι γεγονός ότι ο τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση συμβατικών μονάδων έχει απόδειχθεί ιδιαίτερα αξιόπιστος καθιστώντας τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παραγωγικά για πολλές δεκαετίες. Καθ'αυτού, έχοντας το κριτήριο της εύρυθμης λειτουργίας η παραγόμενη ενέργεια είναι σταθερή και προσαρμοσμένη στις ανάγκες των καταναλωτών χωρίς να υπάρχουν ιδιαίτερα προβλήματα. Παρόλα αυτά, αν και αξιόπιστος, αυτός ο τρόπος παραγωγής συμβαίνει να είναι πολύ ρυπογόνος. Κατά τη διαδικασία αυτή, λόγω των χημικών αντιδράσεων της καύσης εκκρίνεται μεγάλος όγκος αερίων με κύριο από αυτά το διοξείδιο του άνθρακα έχοντας επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία των γύρω οργανισμών. Οι παραπάνω λόγοι έστρεψαν την προσοχή του ανθρώπου στην ανάπτυξη μονάδων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή αλλιώς ΑΠΕ λόγω των πλεονεκτημάτων που αυτές έχουν.

Με σκοπό την απόφυγή της ρύπανσης, τη καλύτερη οικονομική διαχείριση αλλά και την ευκολία στην παραγωγή ο άνθρωπος επεκτάθηκε στην ανάπτυξη μονάδων ΑΠΕ. Οι μονάδες αυτές έχουν την ικανότητα να ανανεώνονται από μόνες τους διατηρώντας το δυναμικό τους αναλλοίωτο ενώ ταυτόχρονα δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων μονάδων αποτελούν τα Φωτοβολταϊκά πάνελ, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, η γεωθερμία και οι

άνεμογεννήτριες στις οποίες και επικεντρώνεται η παρούσα εργασία. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μονάδων αυτών παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Έχουν σχεδόν μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα καθορίζοντας τες πολύ φιλικές προς το περιβάλλον
2. Η πρωτόγεννης τους ύλη δε πρόκειται να εξαντληθεί ποτέ σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα
3. Έχουν μεγάλη συμβολή στην απόκέντρωση των δικτύων μεταφοράς καταργώντας την ανάγκη για μεγάλες απόστάσεις μεταφοράς.
4. Παρουσιάζουν ευελιξία στο μέγεθος κατασκευής τους καταργώντας την ανάγκη για εγκατάσταση μεγάλων συμβατικών μονάδων
5. Έχουν αρκετά μεγάλο χρόνο ζωής [1]

Έχοντας τόσα πολλά πλεονεκτήματα, οι μονάδες ΑΠΕ τείνουν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μονάδες καλύπτοντας όλο ένα και μεγαλύτερο μέρος των αναγκών για ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα υπάρχουν χώρες όπως η Ισλανδία όπου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε ποσοστό 100% από τις μονάδες ΑΠΕ. Ωστόσο η χρήση τους αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση σε μηχανικούς και ερευνητές. Αυτό συμβαίνει για τους εξής λόγους:

1. Ο συντελεστής απόδοσης έχει τη σχετικά μικρή τιμή της τάξης του 30% κατά μέσο όρο ανά τις ΑΠΕ.
2. Η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια αδυνατούν να παρέχονται αδιάλειπτα και σταθερά δημιουργώντας προκλήσεις στους μηχανικούς κατά τη κατασκευή τέτοιων έργων.
3. Κυρίως για τις άνεμογεννήτριες, υπάρχει η άποψη ότι δεν έχουν κομψή αισθητική προκαλώντας θόρυβο και θανάτους πτηνών. Ωστόσο έχει προχωρήσει η λύση στο πρόβλημα αυτό με την εγκατάσταση αιολικών πάρκων στην ανοιχτή θάλασσα [1]

Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ΑΠΕ είναι πολύ λιγότερα από τα πλεονεκτήματα. Όμως υπάρχουν και εξωτερικοί παράγοντες επιβραδυντές των διαδικασιών κατασκευής τους. Παραδείγματα τέτοιων παραγόντων είναι:

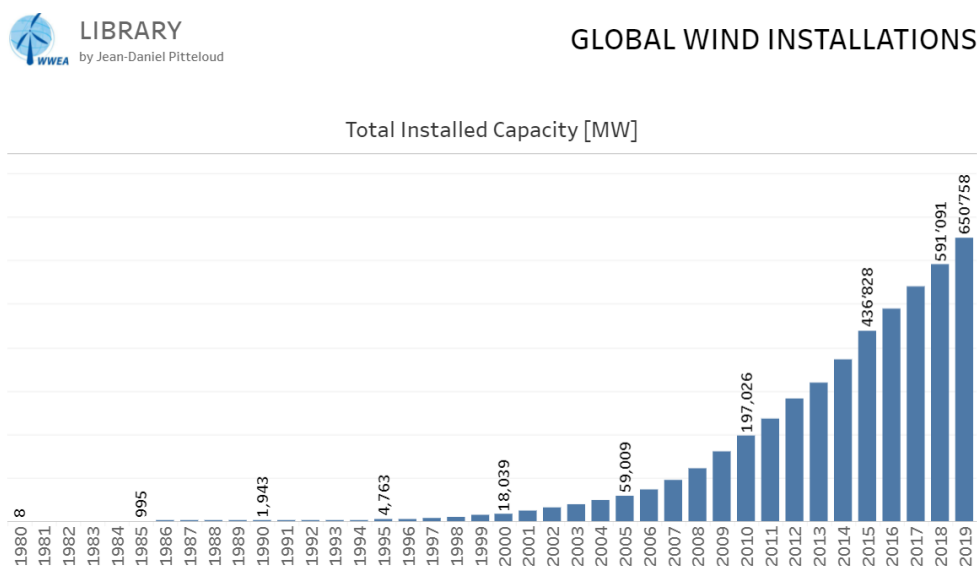
1. Η ανάγκη βελτιστοποίησης των μονάδων που ήδη προυπάρχουν.
2. Η δυσκολία εύρεσης περιοχών στις οποίες το δυναμικό είναι επαρκές.
3. Η ελλιπής ενημέρωση των πολιτών.
4. Γραφειοκρατικές διαδικασίες και κρατικοί μηχανισμοί.

Ένα ουσιαστικό έναυσμα για την ανάπτυξη μονάδων ΑΠΕ στην Ελλάδα αποτέλεσε ο νόμος Ν.2244/94. Με βάση το νόμο αυτό δόθηκε η δυνατότητα σε ιδιώτες να παράγουν από ΑΠΕ ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό την πώληση της στη ΔΕΗ [1].

### 1.3 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ

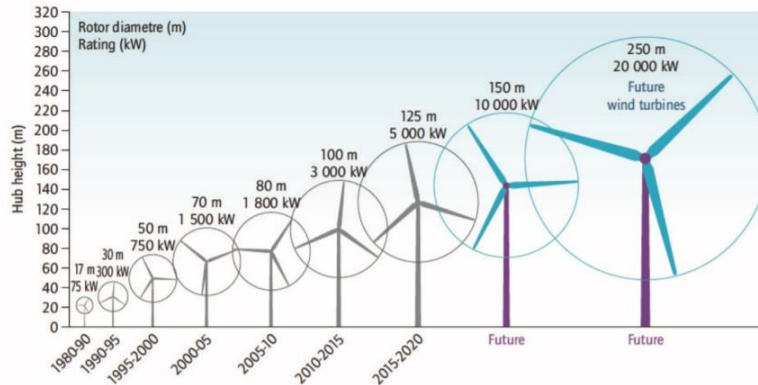
Ιστορικά, η πρώτη τεκμηριωμένη χρήση της αιολικής ενέργειας ήταν ο ανεμόμυλος του Sistan ο οποίος αξιοποιήθηκε για την άντληση νερού και την άλεση σιτηρών. Παρ'οτι η χρήση του άνεμου ήταν γνωστή από τα αρχαία χρόνια, η πρώτη αυτόματη ανεμογεννήτρια με σκοπό την ηλεκτρική παραγωγή κατασκευάστηκε στο Ohio των ΗΠΑ κατά τον 19ο αιώνα από τον Charles Brush [2].

Έκτοτε ο τομέας της αιολικής ενέργειας αποτέλεσε έναν από τους πιο αναδυόμενους τομείς. Ιδιαίτερα μετά τη Πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 70 όπου η ανάγκη για καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας άρχισε να γίνεται συνειδητή. Μέχρι σήμερα η εγκατάσταση ανεμογεννητριών έχει φτάσει σε τόσο μεγάλα επίπεδα που το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει γίνει εμφανώς συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών μονάδων. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.1, η εγκατάσταση ανεμογεννητριών μέχρι σήμερα έχει συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς.[3]



Εικόνα 1.1 Συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα σε MW ανεμογεννητριών. Σύμφωνα με τη Wind Energy International [4]

Με την αύξηση της παραγωγής, αντίστοιχη μορφή πήρε και το μέγεθος των ανεμογεννητριών. Το μέγεθος τους και η πολυπλοκότητα στα συστήματά τους εξελίχθηκαν παρά πολύ γρήγορα δημιουργώντας πολλές τεχνικές προκλήσεις πέρα από αυτή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το αυξημένο ύψος και το βάρος αποτελούν ένα δύσκολο κατασκευαστικό κριτήριο ενώ η γεωλογική διαμόρφωση τείνει να είναι όλο και πιο δύσκολη για την εγκατάσταση ενός τόσο μεγάλου έργου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2 η παραγωγική ικανότητα όπως και τα μεγέθη των ανεμογεννητριών αυξήθηκαν ραγδαία με το χρόνο.[4]



Εικόνα 1.2 Εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών από το 1980 έως και μελλοντικά [5].

Συνήθως οι άνεμογεννήτριες δε συνδεονται μεμονωμενα σαν ανεξάρτητες μονάδες. Στην πληθώρα των περιπτώσεων δεσμευεται μια εκτεταμενη περιοχή με τα κατάλληλα γεωλογικά και άνεμολογικά χαρακτηριστικά όπου εκεί εγκαθίστανται πολλές άνεμογεννήτριες. Η μορφή αυτή λέγεται αιολικό πάρκο. Σε ένα αιολικό πάρκο οι άνεμογεννήτριες τοποθετούνται με στρατηγικό τρόπο σε καθορισμένες απόστασεις ανα μεταξύ τους με σκοπό την βέλτιστη παραγωγή και απόλαβη ισχύος από τον άνεμο. Είναι συνετό λοιπόν να γίνει μια ανάλυση της μεθοδου εξαγωγής ενέργειας από τον άνεμο. [4], [6], [7]

Κύριο συστατικό για την παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες είναι ο άνεμος. Ο άνεμος αποτελεί ένα έντονα μεταβαλλόμενο μέγεθος. Τόσο χωρικά όσο και χρονικά, οι μεταβολές μπορούν να χωριστούν σε κλίμακες. Σε πολύ μικρή κλίμακα μπορούμε να μετρήσουμε εύκολα την στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου με τη χρήση ενός ανεμομέτρου, σε μεσαία κλίμακα Συνήθως υπολογίζουμε μια μέση τιμή των μετρήσεων ενώ σε μια μεγάλη κλίμακα είναι δύσκολο να προβλέψουμε τις μεταβολές που θα εμφανιστούν. Για την πλήρη κατανόηση των καιρικών φαινομένων προαπαιτούμενη είναι η παρατήρηση και επεξεργασία των μετρούμενων δεδομένων. Η συσχέτιση μεταξύ των κλιματικών συνθηκών και της παραγόμενης ισχύος μπορεί να διαφέρει κατά πολύ. Στη θεωρία, μετρήσεις ανέμου για διάστημα μεγαλύτερο των 30 χρόνων μπορούν να δώσουν μια καθαρή εικόνα σχετικά με τα ανεμολογικά στοιχεία της κάθε περιοχής. Επιλέγεται ένα τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς μπορεί να συμβούν μακροχρόνιες μεταβολές οι οποίες να μην αντιπροσωπεύουν το πραγματικό αιολικό δυναμικό. Οι μεταβολές του ανέμου εξαρτώνται έντονα από την τοποθεσία και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Σε μικρές κλίμακες περί της τάξεως μερικών λεπτών η μεταβολή του ανέμου χαρακτηρίζεται ως τύρβη και μπορεί να έχει πολύ μεγάλη επίδραση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες. Ένα από τα κυρία χαρακτηριστικά του ανέμου είναι η τυρβώδης ροή. Γενικότερα στα δίκτυα με μεγάλη διείσδυση αιολικών συστημάτων η τύρβη είναι ένα μέγεθος στο οποίο δίνεται ιδιαίτερη προσοχή καθώς οι μεταβολές μπορεί να είναι καταστρεπτικές. Η ροή αυτή έχει τυχαία μεταβολή καθιστώντας την στιγμιαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου ένα στοχαστικό μέγεθος. Παράλληλα ο άνεμος αποτελεί ένα μέγεθος το οποίο είναι χωρικά και χρονικά συνεχές. Μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τον άνεμο ως μια ποσότητα με σταθερή μέση τιμή και μια τυχαία μεταβαλλόμενη συνιστώσα [3], [7], [8]:

$$V_w(t) = \bar{V} + v(t) \quad (2.1)$$

- $V_w$  : Στιγμιαία ταχύτητα ανέμου
- $\bar{V}$  : Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου
- $v(t)$  : Στιγμιαία τιμή της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου

## 2.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ WEIBULL

Για τη διαδικασία καταγραφής ανεμολογικών στοιχείων μιας περιοχής μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μαθηματικά μοντέλα. Οι διακυμάνσεις που συμβαίνουν σε ετήσιο ή και εποχικό βαθμό μπορούν να εκφραστούν με μια πιθανοτική κατανομή. Μια καλή προσέγγιση για τον πιθανοτικό υπολογισμό φυσικών φαινομένων όπως ο άνεμος είναι η κατανομή Weibull. Αυτή αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τρόπο για τον υπολογισμό της κατανομής του ανέμου δίνοντας μια αρκετά ακριβής προσέγγιση. Η κατανομή Weibull μπορεί να χαρακτηριστεί από τον ακόλουθη συνάρτηση κατανομής [3], [7], [8]:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.2)$$

ενώ η αρθροιστική συνάρτηση κατανομής είναι:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.3)$$

## 2.3 ΘΕΩΡΙΑ ΠΤΕΡΩΣΗΣ

Σημαντική προϋπόθεση για την απολαβή ισχύος από τον άνεμο αποτελεί το αεροδυναμικό κομμάτι του συστήματος. Η κατάλληλη κατασκευή μέσων αλληλεπίδρασης με την αέρια μάζα είναι μια ακόμα πρόκληση για τους μηχανικούς από το ποσοστό απολαβής μέχρι και την αντοχή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στο σύστημα. Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας έχει μεγάλη εξάρτηση από τη κατασκευή, τον προσανατολισμό αλλά και τον έλεγχο των πτερυγίων της. Μια λεπτομερής ανάλυση χρειάζεται εξειδικευμένες γνώσεις αεροναυπηγικής, πράγμα που ξεφεύγει από το επίκεντρο αυτής της εργασίας. Γιαυτό θα χρησιμοποιηθούν απλοποιημένα αλγεβρικά μοντέλα τα οποία έχουν αρκετά μεγάλη ακρίβεια προσέγγισης των πραγματικών τιμών..[7] Με βάση τα παραπάνω, μια απλοποιημένη σχέση για την μηχανική ισχύς που θα εξαχθεί από τον άνεμο είναι η εξής:

$$P_{rot} = Cp(\lambda, \beta) * \left(\frac{1}{2} \rho p R^2 V_{wind}^3\right) \quad (2.4)$$

Όπου:

- $P_{rot}$  : Η αεροδυναμική ισχύς
- $\rho$  : Η πυκνότητα του αέρα
- $R$  : Η ακτίνα του δρομέα
- $V_w$  : Η ταχύτητα του ανέμου
- $C_p$  : Αεροδυναμικός συντελεστής

Από την παραπάνω σχέση παρατηρούμε πως η παραγόμενη μηχανική ισχύς έχει άμεση εξάρτηση από τον αεροδυναμικό συντελεστή. Για την ακρίβεια, ο αεροδυναμικός συντελεστής έχει τόσο μεγάλη συσχέτιση με το ποσοστό της παραγόμενης μηχανικής ισχύος που η επέμβαση σε αυτόν αποτελεί σύννηθες κομμάτι του συστήματος αυτομάτου ελέγχου μιας ανεμογεννήτριας. Εν συνεχεία, ο συντελεστής  $C_p$  αποτελεί μέγεθος επί τοις εκατό. Ουσιαστικά δηλώνει το ποσοστό

της ισχύος του αέρα το οποίο μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ και εξαρτάται από το συντελεστή  $\lambda$  και τη γωνία βήματος  $\beta$ . Ως συντελεστή  $\lambda$  ορίζουμε τον λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\lambda = \frac{\omega_{rot} R}{V_{wind}} \quad (2.5)$$

Αντίστοιχα με τη μηχανική ισχύ, μπορούμε να συμπληρώσουμε και τη σχέση της μηχανικής ροπής. Ισχύει ότι  $T_{rot} = P_{rot} / \omega_{rot}$  άρα με αντικατάσταση του τύπου της μηχανικής ισχύος προκύπτει ότι:

$$T_{rot} = P_{rot} = \frac{(C_p(\lambda, \beta))}{\omega_{rot}} \left( \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{wind}^3 \right) \quad (2.6)$$

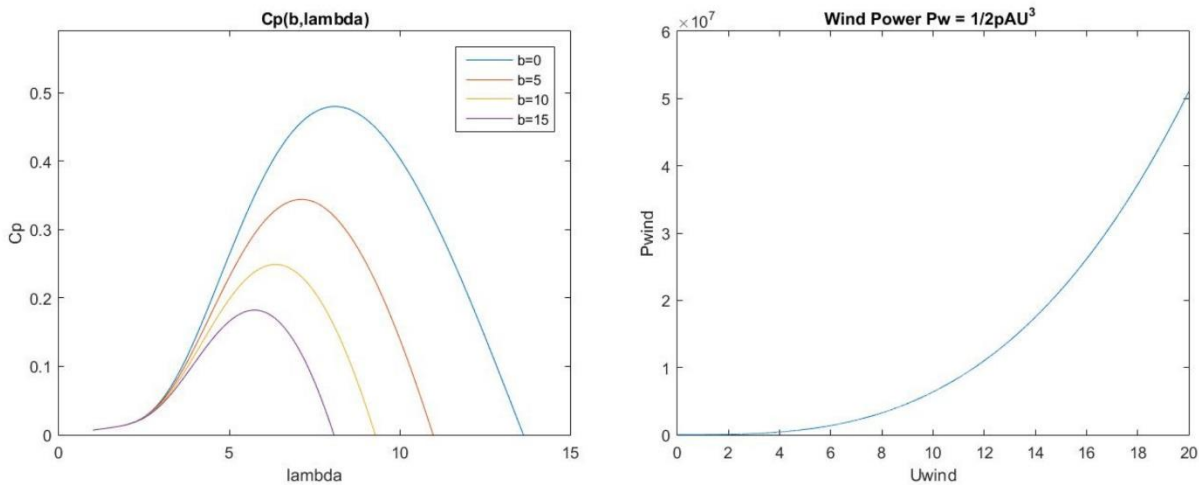
Όπως προαναφέρθηκε μια πλήρης ανάλυση των δυνάμεων που ασκούνται πάνω στα πτερύγια θα ήταν έξω από τα όρια αυτής της εργασίας. Με μια σύντομη αλγεβρική ανάλυση όμως προσεγγίζουμε το  $C_p$  με πολύ καλή ακρίβεια χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση[9]:

$$C_p = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 b - c_4 \right) * e^{\left( \frac{c_5}{\lambda_i} \right)} + c_6 \lambda \quad (2.7)$$

όπου:

$$\lambda_i = \frac{1}{(\lambda - 0.08 V_{wind})} - \frac{0.035}{(b^3 + 1)} \quad (2.8)$$

Οι συντελεστες  $c_{1...n}$  προκύπτουν από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων. Επίσης είναι εμφανές πως η ταχύτητα του ανέμου έχει άμεση επιρροή στον υπολογισμό του  $C_p$ . Στις σύγχρονες άνεμογεννήτριες ο συντελεστής  $C_p$  κυμαίνεται από 0.4 έως και 0.5 ενώ η μέγιστη θεωρητική τιμή λέγεται όριο Beltz και ισούται με περίπου 0.593.



Εικόνα 2.1 Αεροδυναμικός συντελεστής  $C_p$  για τις διάφορες γωνίες ' $b$ ' και ισχύς ανέμου για ταχύτητες έως 20 m/s.

Με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία, η άνεμογεννήτρια πρέπει να μεταβάλλει κατάλληλα τη

ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Με αυτό το τρόπο ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος μπορεί να προσαρμοστεί έχοντας ως αποτέλεσμα την ελεγχόμενη παραγωγή ηλεκτρισμού. Επιπρόσθετα, από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως για γωνίες βήματος  $\beta = 0^\circ$ , ο συντελεστής  $C_p$  έχει τη μέγιστη τιμή του ενώ για κάθε άλλη γωνία ο τελευταίος μειώνεται. Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική κυρίως για λόγους προστασίας και σταθερής παραγωγής ισχύος. Μετά από προκαθορισμένες ταχύτητες άνεμου, το σύστημα αυτομάτου ελέγχου μεταβάλλει τη γωνία βήματος των πτερυγίων έτσι ώστε η ταχύτητα περιστροφής να παραμείνει όσο το δυνατόν πιο σταθερή παράγοντας την ονομαστική ισχύ. Στη πλειοψηφία τους πλέον, οι εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες φέρουν και το σύστημα αυτομάτου ελέγχου της γωνίας πτερυγίων. Με αυτό το τρόπο υπάρχει μεγάλη μείωση των καταπόνησεων στις υψηλές ταχύτητες άνεμου καθώς επίσης και η παραγωγή ισχύος μπορεί να γίνει πιο σταθερή για μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων ανέμου. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με την απόθηκευμένη ενέργεια στο μηχανικό μέρος της ανεμογεννήτριας (χάρη στη ροπή αδράνειας) δημιουργούν ένα πολύ καλό φίλτρο της παραγόμενης ισχύος απέναντι σε απότομες διακυμάνσεις όπως οι ριπές άνεμου. Γίνεται έτσι μια σχετική ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης διαταραχών στα υπόλοιπα διασυνδεδεμένα συστήματα [3], [7], [9] .



#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Η στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή αποτελεί το κύριο μέσο για τη συνεχή μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική σε μηχανική και αντίστροφα. Οι στρεφόμενες μηχανές μπορούν να ποικίλουν σε μέγεθος ενώ και η ισχύς τους μπορεί να έχει επίσης μεγάλες διαφοροποιήσεις. Μπορεί να ζυγίζουν από μερικά γραμμάρια μέχρι εκατοντάδες τόνους ενώ η ισχύς μπορεί να διαφέρει από μερικά watt μέχρι και πάνω από την τάξη μεγέθους του GWatt. Υπάρχουν τρεις τύποι ηλεκτρικών μηχανών οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω[10][11]:

1. Σύγχρονες μηχανές
2. Μηχανές επαγωγής ή αλλιώς ασύγχρονες μηχανές
3. Μηχανές συνεχούς ρεύματος

Με τους δύο πρώτους τύπους ηλεκτρικών μηχανών να αποτελούν μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Επίσης, οι ηλεκτρικές μηχανές έχουν τρεις πιθανούς τρόπους λειτουργίας. Τη λειτουργία κινητήρα, τη λειτουργία γεννήτριας και τη λειτουργία πέδης[10][12].

1. Στη λειτουργία κινητήρα η μηχανή απορροφά ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό τη μετατροπή αυτής σε μηχανική.
2. Στη λειτουργία γεννήτριας η μηχανή χρησιμοποιεί κινητική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρισμού
3. Στη λειτουργία πέδης η μηχανή χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για να μειώσει την εξωτερική μηχανική ενέργεια που της δίνεται. Αυτή η λειτουργία δεν έχει μεγάλο εύρος χρήσεων και συνεπώς δε θα γίνει περεταίρω επέκταση περί της χρήσης αυτής.

Στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε με τις σύγχρονες μηχανές κατά τη λειτουργία τους ως γεννήτριες παραγωγής[10].

#### 3.2 Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ

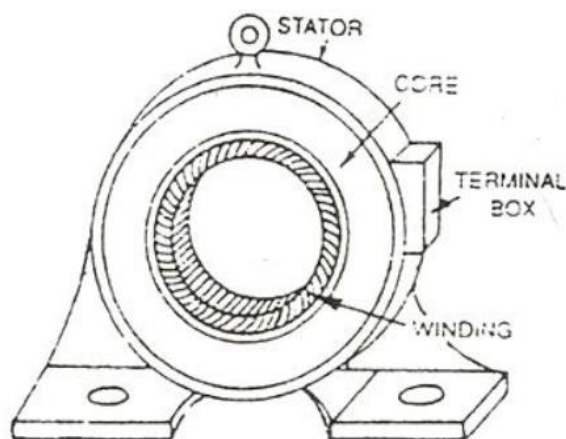
Η πιο βασική συνιστώσα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η σύγχρονη μηχανή. Χρησιμοποιείται ο όρος «σύγχρονη μηχανή» καθώς η θεωρία για τη σύγχρονη γεννήτρια και το σύγχρονο κινητήρα είναι η ίδια. Ωστόσο στη πληθώρα των περιπτώσεων η σύγχρονη μηχανή βρίσκει εφαρμογή στη λειτουργία της ως γεννήτρια. Ακόμα και μέχρι σήμερα οι σύγχρονες γεννήτριες παράγουν το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται. Συνήθως είναι μεγάλες μηχανές που χρησιμοποιούνται σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως ατμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς, κ.α.. Στις συμβατικές μονάδες της Ελλάδας, οι περισσότερες σύγχρονες γεννήτριες είναι της τάξης των 300MW ενώ υπάρχουν και μεγαλύτερες[10].

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι ικανή να παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα με συγκεκριμένη συχνότητα. Μια άλλη ονομασία που έχει είναι σύγχρονος εναλλακτης. Σε μια σύγχρονη μηχανή η ηλεκτρική

ενέργεια παράγεται με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Για να παραχθεί ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, πρέπει ένα αγωγός (πηνίο στη περίπτωση μας) να κινείται σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο ή το μαγνητικό πεδίο να κινείται σε σχέση με τον αγωγό. Στη περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας Χρησιμοποιείται η τελευταία προσέγγιση. Μια ακόμα λειτουργία που έχουν οι σύγχρονες μηχανές είναι ότι μπορούν να λειτουργούν σαν σύγχρονοι πυκνωτές. Στην ουσία αποτελούν σύγχρονους κινητήρες χωρίς μηχανικό φορτίο οι οποίοι απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο ρυθμίζοντας κατάλληλα τη ροή ισχύος[10].

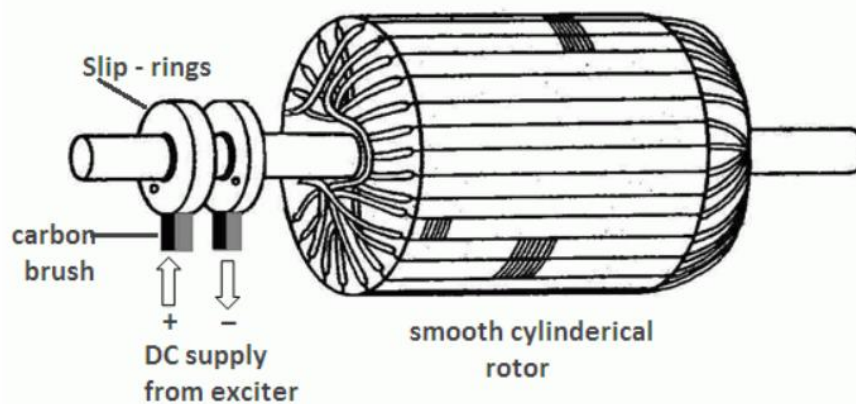
Όπως και κάθε ηλεκτρική μηχανή, οι σύγχρονες μηχανές αποτελούνται από δύο κύρια μέρη. Ένα σταθερό μέρος και ένα κινητό. Το σταθερό μέρος λέγεται στάτης και το κινητό δρομέας[10].

Ο στάτης είναι ένας κοίλος κύλινδρος κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων και φέρει διαμήκεις αύλακες στην εσωτερική του επιφάνεια. Στις αύλακες αυτές τοποθετούνται τα τυλίγματα του στάτη. Τυπικά, τα τυλίγματα του στάτη είναι τριφασικά και διευθετούνται κατά  $120^\circ$  ανά μεταξύ τους στο χώρο σε σύνδεση αστέρα. Στην εικόνα 3.1. φαίνεται η γενική δομή του στάτη μιας ηλεκτρικής μηχανής[10].



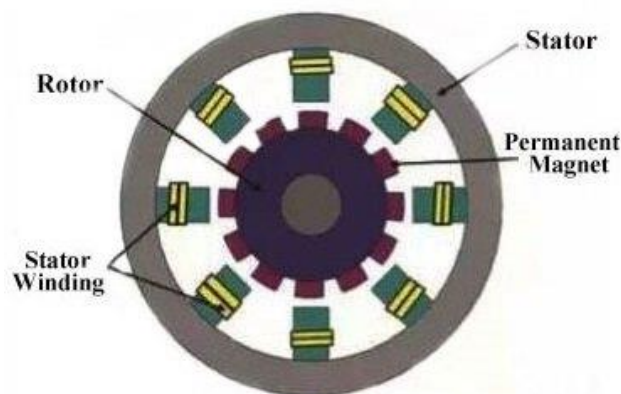
Εικόνα 3.1 Στάτης ηλεκτρικής μηχανής [13].

Ο δρομέας βρίσκεται μέσα στο στάτη. Αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό και έχει κυλινδρικό σχήμα ενώ η τοποθέτηση του διευθετείται με ένα μικρό διάκενο από το στατή. Στο δρομέα βρίσκεται το τύλιγμα πεδίου το οποίο τροφοδοτείται από πηγή σταθερού ρεύματος παράγοντας βόρειο και νότιο μαγνητικό πόλο. Η πηγή αυτή μπορεί να είναι εξωτερική ή να βρίσκεται πάνω στον άξονα της μηχανής. Με τη χρήση εξωτερικής πηγής, ο δρομέας εφοδιάζεται με ψήκτρες και δακτύλιο ολίσθησης. Η μέθοδος αυτή έχει το μειονέκτημα της συχνής φθοράς των ψηκτρών έχοντας την απαίτηση της συχνής αντικατάστασης και συντήρησης. Αντίστοιχα με τη χρήση εσωτερικής πηγής, πάνω στον άξονα είναι τοποθετημένη μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος η οποία λειτουργεί ως γεννήτρια. Η παραγόμενη τάση της γεννήτριας αυτής ανορθώνεται και προσδίδεται στο τύλιγμα διέγερσης. Τέτοιες μηχανές ονομάζονται αυτοδιεγείρομενες (self-excited). Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλες μηχανές ενώ παρεχεται και η ικανότητα ελέγχου του ρεύματος διέγερσης[10].



Εικόνα 3.2 Κυλινδρικός δρομέας σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης [14].

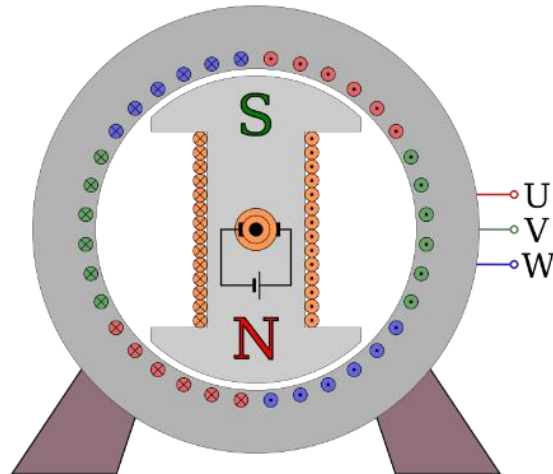
Η αλληλεπίδραση του δρομέα και του στατη είναι σχετικά απλή. Στα τυλίγματα του δρομέα παράγεται περιστρεφόμενη μαγνητική ροή ενώ τα πηνία του στατη παραμένουν σταθερά. Έτσι περιστρεφόμενη μαγνητική ροή του δρομέα παράγει ηλεκτρική ενέργεια στα πηνία του στατη. Η παραγωγή μαγνητικού πεδίου από το δρομέα μπορεί να γίνει και με τη χρήση μόνιμου μαγνήτη. Με τη τοποθέτηση μόνιμου μαγνήτη δεν απαιτείται η τροφοδοσία με συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αξιοπιστίας και τη μείωση των απαιτήσεων για συντήρηση. Επιπλέον, καθώς δεν εφαρμόζεται απευθείας τροφοδοσία στο δρομέα μειώνονται οι θερμικές απώλειες και η καταπόνηση του συστήματος. Τα μόνα μειονέκτηματα αυτής της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος των μονίμων μαγνητών καθώς και η θερμική απόμαγνητιση του υλικού. Αναφορικά, όταν η σύγχρονη μηχανή χρησιμοποιείται ως κινητήρας το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται από τα τριφασικά τυλίγματα του στατη ακολουθώντας τις ίδιες παραδοχές με αυτές της σύγχρονης γεννήτριας. Μια πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μοίμων μαγνητών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα[10]:



Εικόνα 3.3 Πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών [15].

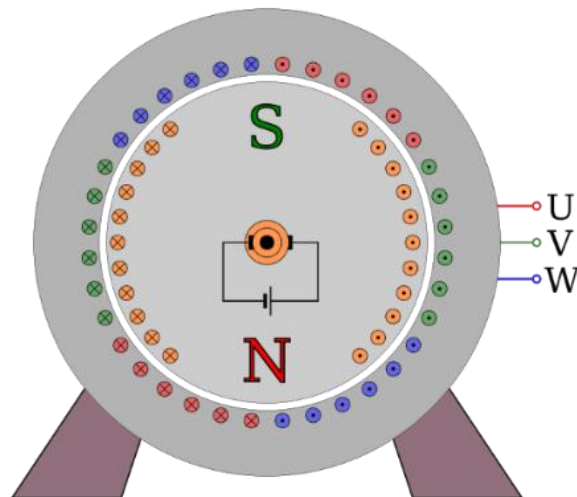
Ο δρομέας μπορεί να χαρακτηριστεί από δύο βασικούς τύπους. Το δρομέα με εκτύπους πόλους και τον κυλινδρικό δρομέα. Ο κυλινδρικός δρομέας ουσιαστικά αποτελεί δρομέα με δύο πόλους.

Συνήθως στις μηχανές με εκτύπους πόλους τοποθετούνται και τυλίγματα απόσβεσης από βραχυκυκλωμένες ράβδους χαλκού οι οποίες διευθετούνται κατά το μήκος της επιφάνειας των πόλων. Η τοποθέτηση αυτή αφορά τη μείωση των μηχανικών ταλαντώσεων γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η εικόνα 3.4 αναπαριστά δρομέα με εκτύπους πόλους[10].



Εικόνα 3.4 Δρομέας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας με εκτύπους πόλους [16].

Ενώ αντίστοιχα η εικόνα 3.5 αναπαριστά κυλινδρικό δρομέα.



Εικόνα3.5 Κυλινδρικός δρομέας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας [16].

Σε μια τετραπόλικη σύγχρονη γεννήτρια όταν ο δρομέας κάνει τη μισή περιστροφή η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροή κάνει ένα πλήρη κύκλο (για κάθε ένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη). Μπορεί ευκολα να διαπιστωθεί πως η συχνότητα επαγωγής της ηλεκτρομαγνητικής ροής συνδέεται με τον αριθμό πόλων και στροφών με την εξής σχέση[10]:

$$f = \frac{P}{2} \frac{N}{60} \quad (3.1)$$

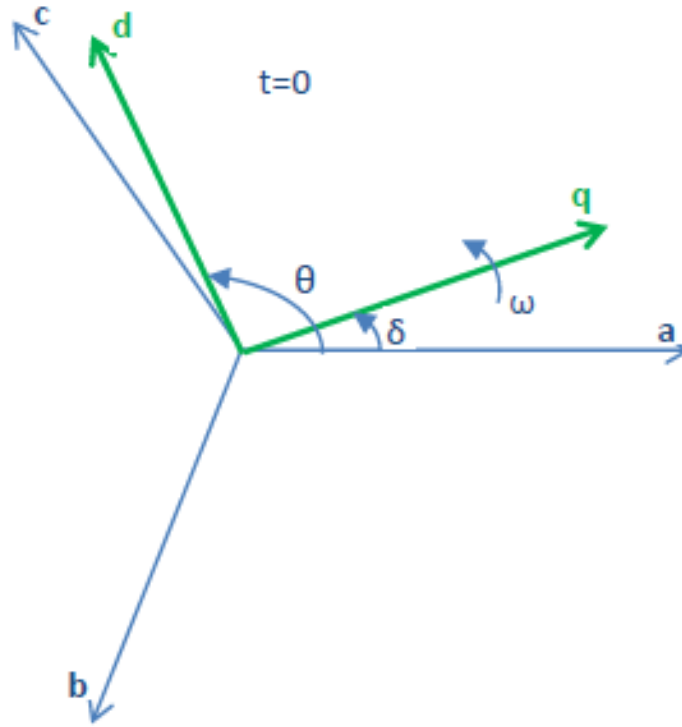
Όπου :

- P : Ο αριθμός των πόλων
- N : Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε στροφές ανα λεπτό (rpm)

Είναι σαφές λοιπόν πως η ηλεκτρική συχνότητα που παράγεται, συγχρονίζεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής. Παρατηρούμε επίσης πως για να παραχθεί τάση συχνότητας 50Hz από μια στροβιλογεννήτρια (διπολική σύγχρονη γεννήτρια ή αλλιως κυλινδρικού δρομέα) , η ταχύτητα περιστροφής θα πρέπει να ισούται με 3000rpm. Ενώ με τον ίδιο τύπο σε μία τετραπόλικη γεννήτρια με έκτυπους πολλους, ο αριθμός στροφών θα πρέπει να φτάσει τα 1800rpm για να παράξει την ίδια συχνότητα. Είναι προφανές πως σε τόσο μεγάλες στροφές αναπτύσσεται μία τεράστια φυγόκεντρος δύναμη η οποία θα οδηγήσει σε μηχανικές αστοχίες ακόμα και σε καταστροφές της μηχανής. Συνεπώς σε γενικό επίπεδο οι γεννήτριες με εκτύπους πόλους έχουν μεγαλύτερο αριθμο πόλων (από 10 έως και πάνω από 40) ώστε να μπορούν να παράγουν την απαιτούμενη συχνότητα σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες. Αντιθέτως, οι σύγχρονες γεννήτριες κυλινδρικού δρομέα λόγω της κατασκευής τους έχουν προδιαγραφες για πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες[10].

### 3.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ PARK

Κατά τη μελέτη συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι συχνό να χρησιμοποιούνται μαθηματικοί μετασχηματισμοί. Ο μετασχηματισμός Park αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο επίλυσης τριφασιών συστημάτων διευκολύνοντας κατά πολύ στους υπολογισμούς των παραμέτρων. Η εφαρμογή του μετασχηματισμού αυτού, είναι να στρέφει το πλαίσιο αναφοράς τριφασικών συστημάτων με στόχο την απλοποίηση τους. Ο μετασχηματισμός Park ανάγει τριφασικά μεγέθη σε ένα ορθογώνιο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς και στη συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας. Οι συνιστώσες που παράγονται λέγονται συνιστώσες ευθέως άξονα, εγκάρσιου άξονα και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα. Η τελευταία υπάρχει μόνο σε περίπτωση ασυμμετρίας των τριφασικών ποσοτήτων διευκολύνοντας ακόμα περισσότερο την ανάλυση. Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζεται διανυσματικά ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα με τις συνιστώσες του στρεφόμενου πλαισίου.[11]



Εικόνα 3.6 Συμμετρικό τριφασικό μονέλο ποσοτήτων a,b,c με τις συνιστώσες του μετασχηματισμού Park d,q. Παρατηρούμε πως σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας δεν υπάρχει.

Ο μετασχηματισμός Park προτείνει το πολλαπλασιασμό οποιονδήποτε τριφασικών ποσοτήτων με τη μήτρα του μετασχηματισμού η οποία φαίνεται παρακάτω[11].

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

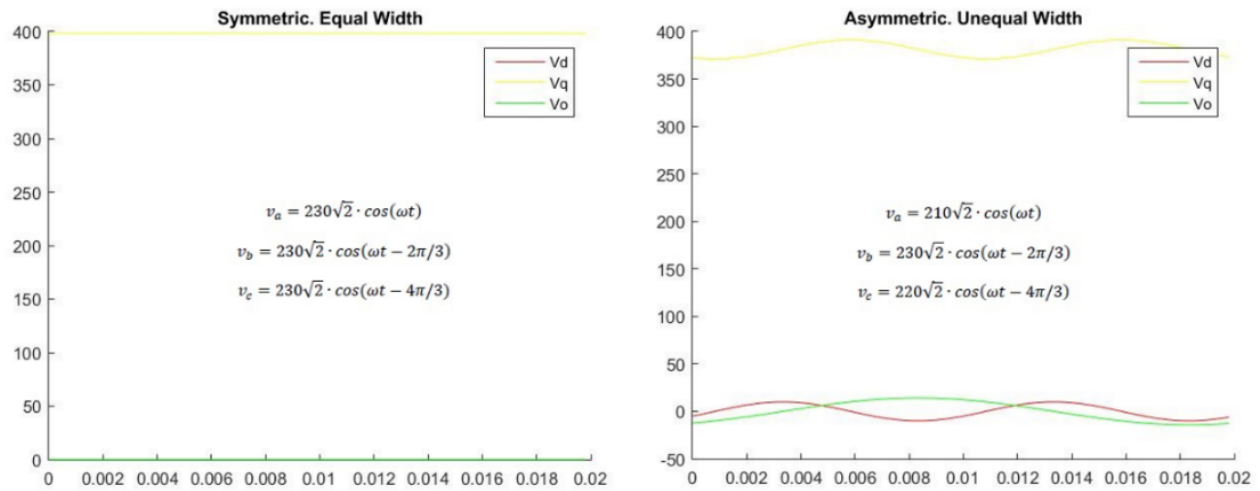
Παραδείγματος χάρη μια τριφασική ποσότητα τάσεων  $[Va \quad Vb \quad Vc]^T$  κατα το μετασχηματισμο Park θα αναλυθεί ως εξής[11]:

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \\ Vo \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Πολλαπλασιάζοντας με τον αντιστροφο πίνακα του μετασχηματισμού μπορούμε να ανακτήσουμε τις αρχικές τριφασικές ποσότητες a,b,c από τις συνιστώσες του πλαισίου d,q,0. Δηλαδή η μητρα του αντιστροφου μετασχηματισμού Park έχει την εξής μορφή[11]:

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Μια αριθμητική προσέγγιση των παραπάνω φαίνεται στα διάγραμμα της εικόνας 3.7



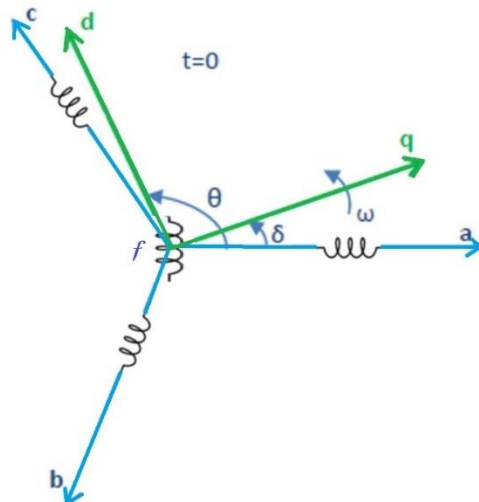
Εικόνα 3.7 Προσομοίωση των τιμών των d,q,0 συνιστωσών του στρεφόμενου πλαισίου του μετασχηματισμού Park για συμμετρικό ίσου πλάτους και ασύμμετρο άνισου πλάτους τριφασικό σύστημα,

Η ευελίξια που παρέχει ο μετασχηματισμός Park σε ένα τριφασικό σύστημα είναι τεράστια. Ως βασικό πλεονέκτημα έχει την απεξάρτηση από τους υπολογισμούς πλάτους και γωνίας φάσεων μιγαδικών ποσοτήτων αντιμετωπίζοντας το τριφασικό σύστημα σαν μια DC ποσότητα συνιστωσών. Συνεπώς και θα χρησιμοποιηθεί ευρέως στους υπολογισμούς των παραμέτρων της σύγχρονης γεννήτριας.



### 3.4 Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ PARK

Σαν πρώτο βήμα της ανάλυσης των παραμέτρων μιας σύγχρονης γεννήτριας αντικαθιστούμε τα κατανομημένα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα με ισοδύναμα τυλίγματα. Αυτά έχουν κατάλληλες και ίδιες αμοιβαίες επαγωγές ενώ η τοποθέτηση τους βρίσκεται στο μήκος των αξόνων τους. Η εικόνα 3. 8 απεικονίζει τα συγκεντρωμένα τυλίγματα του στάτη a, b, c και ένα τυίγμα διέγερσης f που αφορά το τυίγμα πεδίου[11].



Εικόνα 3.8 Αναπαράσταση σύγχρονης μηχανής με συγκεντρωμένα τυλίγματα.

Το κάθε ένα τριφασικό τυίγμα της μηχανής χαρακτηρίζεται από μια αντίσταση  $R$  μια αυτεπαγωγή  $L$  αλλά και την αμοιβαία επαγωγή από τα γειτονικά πηνία. Τις ποσότητες αυτές τις θεωρούμε ίσες σε όλα τα τυλίγματα. Θεωρούμε επίσης την αυτεπαγωγή του δρομέα σταθερή και ίση με  $L_f$  [11].

Εν συνεχεία θα αναλυθούν οι εξισώσεις τάσης της μηχανής. Ως θετική φορά των αξόνων του στρεφόμενου πλαισίου δηλαδή αυτή που τα ρεύματα εξέρχονται της μηχανής (λειτουργία γεννήτριας) θεωρείται η αντίθετη του ωρολογίου. Επιπλέον ισχύει ότι η πεπλεγμένη ροή του κάθε τυλίγματος από τα παραπάνω εξαρτάται από το ρεύμα του ίδιου του πηνίου καθώς και από το ρεύμα των γειτονικών. Δηλαδή οι εξισώσεις πεπλεγμένων ροών γράφονται ως εξής[11]:

$$\begin{aligned}\lambda_a &= L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{af}i_f \\ \lambda_b &= L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{bf}i_f \\ \lambda_c &= L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c + L_{cf}i_f \\ \lambda_f &= L_{fa}i_a + L_{fb}i_b + L_{fc}i_c + L_{ff}i_f\end{aligned}\tag{3.5}$$

Ενώ οι τάσεις των τυλιγμάτων της μηχανής τοποθετούνται ως εξής:



$$\begin{aligned}
v_a &= -R_s i_b - \frac{d\lambda_b}{dt} \\
v_b &= -R_s i_b - \frac{d\lambda_b}{dt} \\
v_c &= -R_s i_c - \frac{d\lambda_c}{dt} \\
v_f &= -R_s i_f - \frac{d\lambda_f}{dt}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Είναι συνετό τέτοια συστήματα να αναλύονται υπό μορφή πινάκων. Συνεπώς θέτουμε:

$$v = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ -v_f \end{bmatrix}, i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Και

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix}, \tag{3.8}$$

$$L(\theta) = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ba} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Σημαντική είναι η παρατήρηση ότι ο επαγωγικός πίνακας  $L$  εξαρτάται από τη γωνία ‘ $\theta$ ’ άρα και το χρόνο ‘ $t$ ’. Η γωνία αυτή είναι η γωνία που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.8 και καθορίζει τη στιγμιαία θέση του  $d$  άξονα του στρεφόμενου πλαισίου ως προς ακίνητο άξονα αναφοράς. Στη περίπτωση αυτή ο σταθερός άξονας είναι ο άξονας ‘ $a$ ’ [11]ε. Ισχύει ότι:

$$\theta = \omega t + \theta_0 = \omega t + \delta + \frac{\pi}{2} \tag{3.10}$$

Συνεπώς με αντικατάσταση των παραπάνω σχέσεων στη σχέση (3.7),

$$\begin{aligned}
v &= -Ri - \frac{d\lambda}{dt} \\
&= -Ri - \frac{d}{dt}(L(\theta)i) \rightarrow \\
&= -Ri - L(\theta)\frac{di}{dt} - \frac{dL(\theta)}{d\theta}\frac{d\theta}{dt}i
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Η κατάληξη αυτή δεν είναι επιθυμητή καθώς οι διαφορικές εξισώσεις δεν έχουν σταθερούς συντελεστές. Στη περίπτωση αυτή ο μετασχηματισμός Laplace δεν είναι εφαρμόσιμος κάνοντας τη χρήση του μετασχηματισμού αναγκαία[11].

Το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα τυλίγματα απόσβεσης, το σύστημα ελέγχου διέγερσης και η εξίσωση κίνησης του δρομέα (η γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  λαμβάνεται σταθερή) δίνεται στην συνέχεια[11]ε.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \\ -v_f \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} R_s & \dot{\theta}L_q & 0 & 0 \\ -\dot{\theta}L_d & R_s & 0 & -\dot{\theta}\sqrt{\frac{3}{2}}M_f \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix}}_R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} - \underbrace{\begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}M_f \\ 0 & L_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}}M_f & 0 & 0 & L_{ff} \end{bmatrix}}_L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Ωστόσο είναι σύνηθες η εξίσωση 3.12 να λύνεται ως προς το ρεύμα εξόδου ως εξής:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} = -L^{-1}R \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} - L^{-1} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \\ -v_f \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Όπου:

- $i_d, i_q, i_0, v_d, v_q, v_0$  οι dq0 συνιστώσες των ρεύματων και τάσεων του στάτη
- $L_d, L_q, L_0$  οι dq0 συνιστώσες επαγωγών της μηχανής
- $i_f, v_f$  το ρεύμα και η τάση διέγερσης
- $L_{ff}, M_f$  η αυτεπαγωγή και η αμοιβαία επαγωγή του τύλιγματος διέγερσης

Για σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα, οι μεταβλητές  $L_d, L_q$  υπολογίζονται ως εξής:

$$L_d = L_q = L_s + M_s \quad (3.14)$$

Ενώ ή παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P_G = v_d i_d + v_q i_q + v_0 i_0 \quad (W) \quad (3.15)$$

$$Q_G = v_d i_q - v_q i_d \quad (Var) \quad (3.16)$$

Για τη πλήρη προσομοίωση του μοντέλου μιας σύγχρονης γεννήτριας, αναγκαία είναι η αρχειοποίηση των εξισώσεων. Η διαδικασία αυτή αναλύεται αμέσως παρακάτω.

Θεωρούμε ότι η  $V_a(0^\circ)$  είναι η τάση στην έξοδο της φάσης ‘α’ και οτι η γεννήτρια τροφοδοτεί φορτίο  $S(VA)$  με επαγωγικό συντελεστή ισχύος  $\cos(\theta_1)$ . Τότε το ρεύμα στη φάση ‘α’ θα είναι

$$\tilde{I}_a = \frac{S}{3V_a} \angle -\theta_1 \text{ (A)} \quad (3.17)$$

Η τάση πίσω από την αντίδραση  $X_d = \omega L_d$  είναι:

$$E_a \angle \delta = V_a \angle 0^\circ + jX_d \tilde{I}_a \text{ (V)} \quad (3.18)$$

Το ρεύμα και η τάση στο τύλιγμα διέγερσης υπολογίζονται από τις επόμενες σχέσεις:

$$i_f = \frac{\sqrt{2}|E_a|}{\omega M_f} \text{ (A)} \quad (3.19)$$

$$v_f = R_f i_f \text{ (V)} \quad (3.20)$$

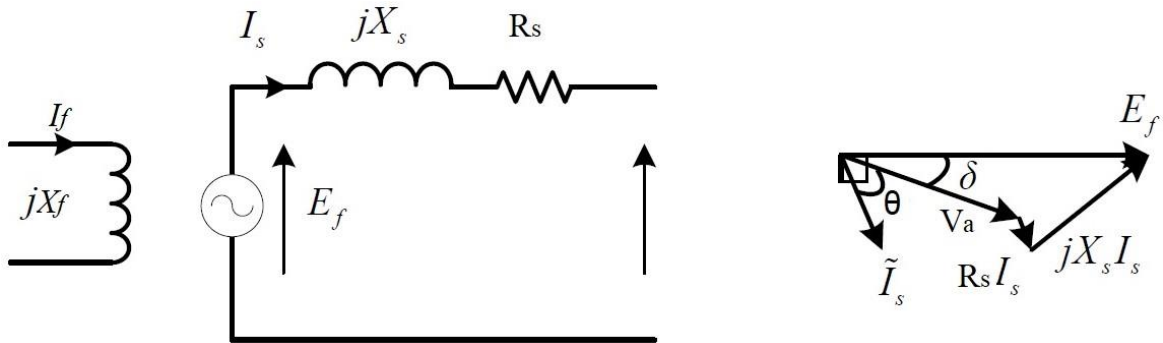
Οι τάσεις  $v_d$  και  $v_q$  αρχικοποιούνται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} \left( \frac{v_q}{\sqrt{3}} + j \frac{v_d}{\sqrt{3}} \right) e^{j\delta} &= V_a \angle 0^\circ \rightarrow \\ \left( \frac{v_q}{\sqrt{3}} + j \frac{v_d}{\sqrt{3}} \right) e^{j\delta} &= V_a \angle -\delta \rightarrow \\ \begin{cases} v_d = \sqrt{3} \operatorname{Re}\{V_a \angle -\delta\} \text{ (V)} \\ v_q = \sqrt{3} \operatorname{Im}\{V_a \angle -\delta\} \text{ (V)} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Ενώ αντίστοιχα τα  $i_d$  και  $i_q$  αρχικοποιούνται ως εξής:

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{3} \operatorname{Re}\{I_a \angle -\theta_1 - \delta\} \text{ (A)} \\ i_q = \sqrt{3} \operatorname{Im}\{I_a \angle -\theta_1 - \delta\} \text{ (A)} \end{cases} \quad (3.22)$$

Μία διανυσματική αναπράσταση των παραπάνω τύπων φαίνεται στην εικόνα 3.9



Εικόνα 3.9 Ανά φάση ισοδύναμο και διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης.

Η γωνία ‘δ’ που παρουσιάστηκε και προηγουμένως ονομάζεται γωνία ισχύος. Ο υπολογισμός της γωνίας αυτής καθιστά την αριχοκοποίηση του μοντέλου αναπόσπαστο κομμάτι καθώς αυτή είναι που καθορίζει τις τιμές των dq συνιστωσών του στρεφόμενου πλαισίου του μετασχηματισμού Park. Όταν η τιμή της είναι θετική, η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ)  $E_a$  προηγείται της τάσης  $V_a$  και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Αντίθετα όταν η τιμή της είναι αρνητική, τότε η  $E_a$  έπεται της  $V_a$  και η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Επίσης ισχύει ότι η παραγόμενη ισχύς έχει άμεση

εξάρτηση από τη γωνία 'δ'. Μια αύξηση της παρεχόμενης ισχύος περαν του φυσιολογικού μπορεί να οδηγήσει απότομα σε γωνίες 'δ' κατά τις οποίες η μηχανή θα βρεθεί σε αποσυγχρονισμό[10][11] [12].

Για μηχανή με κυλινδρικό δρομέα όπου  $X_d = X_q$  μπορεί εύκολα να προκύψει πως μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ ανά φάση ως εξής:

$$\begin{cases} P_g = \frac{|E||V|}{X_d} \sin(\delta) \\ Q_g = \frac{|V|(|E| \cos(\delta) - |V|)}{X_d} \end{cases} \quad (3.23)$$

Όταν οι ποσότητες E και V εκφράζονται σε ανά μονάδα, τότε οι  $P_g$  και  $Q_g$  εκφράζονται και αυτές σε ανά μονάδα. Με βάση τη σχέση 3.17 αν διατηρήσουμε το ρεύμα πεδίου σταθερό, τότε και η ενεργός τιμή της |E| είναι και αυτή σταθερή. Κάτω από αυτή τη συνθήκη οι ποσότητες ισχύος της σχέσης 3.20 εξαρτώνται μόνο από τη γωνία 'δ'. Είναι επίσης εύκολο να παρατηρηθεί πως για γωνία  $\delta = 90^\circ$  η ενεργός ισχύς παίρνει τη μέγιστη τιμή της  $P_g = P_{max}$ . Μια προσπάθεια αύξησης της ισχύος πέραν της  $P_{max}$  θα οδηγήσει τη γεννήτρια σε απόσυγχρονισμό από το δίκτυο προκαλώντας πιθανά προβλήματα ακόμα και κατάρρευση[10]. Για να απόφευχθεί αυτό το πρόβλημα, οι σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν σε χαμηλές γωνίες ισχύος της τάξεως των  $20^\circ$  [11] [12].

### 3.5 Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ PARK

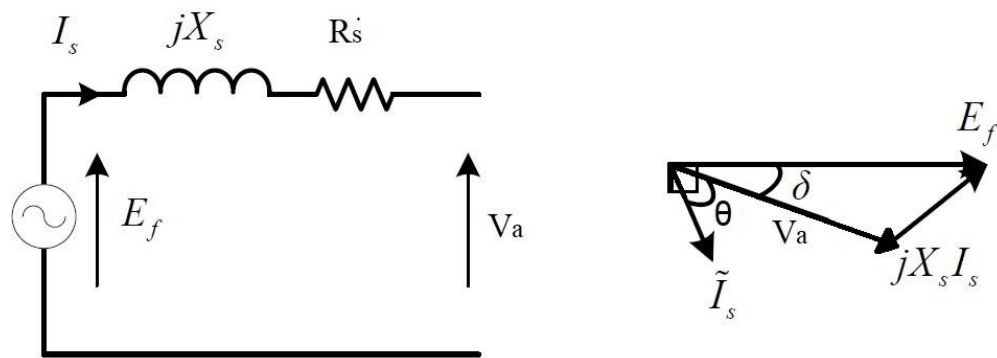
Η μοντέλοποίηση μια σύγχρονης γεννητράς μονίμων μαγνητών με τη χρήση του μετασχηματισμού Park δεν έχει μεγάλες διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης. Η κυρία διάφορα τους βρίσκεται στον τρόπο παραγωγής του μαγνητικού πεδίου από το τύλιγμα διέγερσης. Οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν μια μαγνητεγερτική δύναμη στο διάκενο η οποία έχει χωρικά ημίτονοειδη μορφή[7]. Με την υποθεση της ημιτονοειδούς κατανομής της μαγνητικής ροής, μπορούμε να περιγραφούμε τη τελευταία μέσω διανυσματος. Συνεπώς η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_f$  η οποία εκχυεται από τους μόνιμους μαγνήτες στο κυκλώμα του στάτη μπορεί να εκφραστεί με τη παρακάτω σχέση [7][11]:

$$E_f = j\omega_{rotor}\lambda_{magnet} = j 2\pi f \lambda_{magnet} \quad (3.24)$$

Όπου :

- $f$  : Η ηλεκτρική συχνότητα
- $\lambda$  : Η μαγνητική ροή που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες

Όπως και με τη σύγχρονη μηχανή ηλεκτρικής διέγερσης μια διανυσματική αναπαράσταση των παραπάνω τύπων φαίνεται στην εικόνα 3.10



Εικόνα 3.10 Ανά φάση ισοδύναμο και διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών[10].

### 3.6 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) πρέπει να παρέχει αδιάλειπτα την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια στο φορτίο υπό καθορισμένα όρια τάσης και συχνότητας. Γενικότερα όσο πιο μεγάλη αξιοπιστία έχει ένα ΣΗΕ σε σχέση με τη ποιότητα της παρεχόμενης τάσης και συχνότητας τόσο πιο επιτυχημένη θεωρείται η λειτουργικότητα του. Συνεπώς η Μόνιμη Κατάσταση λειτουργίας μπορεί να χαρακτηριστεί από την εξισορρόπηση μεταξύ των απαιτήσεων φορτίου και παραγωγής των γεννητριών σε πραγματική και άεργο ισχύ. Αντίστοιχα ως Διαταραχή ορίζουμε την οποιαδήποτε ανεπιθύμητη είσοδο στο το σύστημα η οποία επιδρά δυσμενώς στη λειτουργία του. Σε ένα ΣΗΕ οι διαταραχές μπορεί να είναι εσωτερικές ή εξωτερικές. Μερικά παραδείγματα είναι η απότομη ή απρογραμμάτιστη είσοδος-εξόδος ενός μεγάλου καταναλωτή, η απότομη ή απρογραμμάτιστη έξοδος ενός σταθμού παραγωγής, η διακοπή συνέχειας σε μια γραμμή μεταφοράς ή και διάφορα βραχυκυκλώματα που μπορεί να συμβούν[11] [12].

Ένα σύστημα είναι ευσταθές όταν κάτω από την επίδραση οποιασδήποτε διαταραχής αυτό μπορεί να επανέλθει σε κάποια σταθερή και επιθυμητή μόνιμη κατάσταση. Σε αντίθεση, ένα σύστημα είναι ασταθές όταν κάτω από την επίδραση μιας διαταραχής, αυτό δεν επανέρχεται σε μια αποδεκτή μόνιμη κατάσταση ή λειτουργεί διαρκώς σε μεταβατική λειτουργία. Οι διαταραχές που μπορούν να δημιουργήσουν αστάθεια είναι εκείνες που προκαλούν έντονες μεταβολές στις φορτίσεις των γεννητριών των σταθμών παραγωγής. Στη περίπτωση που κάποια γεννήτρια ξεπεράσει το προκαθορισμένο όριο ευστάθειας, τότε αυτή τίθεται εκτός λειτουργίας για λόγους ασφάλειας. Σε μια έντονη διαταραχή η απότομη μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη μπορεί να οδηγήσει σε απόσυγχρονο ακόμα και σε πλήρη διακοπή της ηλεκτροδότησης. Συνεπώς είναι αναγκαίοι οι γρήγοροι χειρισμοί από συστήματα αυτομάτου ελέγχου και χειροκίνητες μεθόδους. Τα συστήματα αυτά είναι τοποθετημένα σε όλες τις βαθμίδες του συστήματος ηλεκτροδότησης για την αποφυγή της δημιουργίας εκτεταμένων προβλημάτων[11]ε [12].

Παρατηρούμε λοιπόν πως το πρόβλημα της ευστάθειας του συστήματος συσχετίζεται άμεσα με τη δυναμική συμπεριφορά των γεννητριών των σταθμών παραγωγής. Στόχος είναι η διατήρηση του συγχρονισμού και η άμεση επέμβαση κατά τις διαταραχές που μπορούν να συμβούν κατά τη

διαδικασία παραγωγής. Συνήθως η συμπεριφορά ενός συστήματος κατά τις διάφορες διαταραχές παρουσιάζει αποσβενούμενες ταλαντώσεις γύρω από το σημείο της νέας μετάβασης οι οποίες αντανakλώνται και στο υπόλοιπο ΣΗΕ[12].Αναλογα με τη μορφή που έχει η διαταραχή μπορούμε να διακρινουμε την ευταθεια του συστήματος σε τρεις κατηγορίες αυτές είναι[11] :

1. Η ευστάθεια μόνιμης καταστάσης (steady-state stability)
2. Η δυναμική ευστάθεια (dynamic stability)
3. Η ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης (transient-state stability) [12]

Η ευσταθεια μονιμης καταστασεις παρουσιαζει ευκολια στον υπολογισμο της με τη χρηση αλγεβρικων εξισωσεων. Αφορα αργες, μικρες και βαθμιαιες ή συνεχεις μεταβολες οι οποιες Συνήθως είναι ελεγχόμενες και με τον καταλληλο ελεγχο δεν αντανakλουν μεγάλες διαταραχες στο υπολοιπο ΣΗΕ [11] [12].

Η δυναμική ευστάθεια άφορα μικρού μεγέθους απότομες διαταραχές. Ο υπολογισμός της αποτελεί μια εύκολη διαδικασία καθώς λόγω του μικρού μεγέθους των διαταραχών είναι εφικτή η γραμμικοποίηση των αντίστοιχων εξισώσεων[12].

Η Μεταβατική Ευστάθεια άφορα απότομες μεταβολές μεγάλου μεγέθους. Η μελέτη μεταβατικής ευστάθειας εστιάζεται κυρίως στο να μη ξεπεράσουν οι γεννήτριες των σταθμών παραγωγής τα όρια της ευστάθειας τους. Δηλαδή η μεταβατική ευστάθεια χαρακτηρίζει την ικανότητα των σύγχρονων γεννητριών να διατηρήσουν το συγχρονισμό τους κατά τη διάρκεια των πρώτων κύκλων ταλάντωσης των στροφών τους που ακολουθούν μετά την εμφάνιση της διαταραχής. Για τη διερεύνηση των προβλημάτων που σχετίζονται με τη μεταβατική ευστάθεια πρέπει να γίνει χρήση των δυναμικών μοντέλων των σύγχρονων γεννητριών των σταθμών παραγωγής λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη και τα δυναμικά μοντέλα των ρυθμιστών τάσης-αεργής ισχύος και στροφών-πραγματικής ισχύος που διαθέτουν. Λόγω του μεγάλου μεγέθους των διαταραχών δεν είναι δυνατή η γραμμικοποίηση των μη γραμμικών υπαρχουσών αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων καθώς καθ'αυτου οι υπολογισμοί θα είχαν μεγάλες αστοχίες. Σε ένα ΣΗΕ υπάρχει ένας πολύ μεγάλος αριθμός σύγχρονων γεννητριών. Συνεπώς και το πρόβλημα της διερεύνησης της μεταβατικής ευστάθειας αποτελεί μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία ακόμα και με τη σημερινή υπολογιστική ισχύ. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μεταβατική ευστάθεια έχει μεγαλύτερη εξάρτηση από το μέγεθος, το είδος και τη θέση της διαταραχής παρά από τη προηγούμενη της διαταραχής μόνιμη κατάσταση[11] [12].

Όσον αφορά το μηχανικό μέρος της μηχανής, η διαφορική εξίσωση ροπής-γωνιακής ταχύτητας του άξονα περιστροφής αναγράφεται παρακάτω.

$$H_{gen} \frac{d\omega_{gen}}{dt} = T_{in} - T_{out} - b\omega_{gen} \quad (3.25)$$

Όπου:

- $\omega$  : Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας

- $H_{gen}$  : Η ροπή αδράνειας του δρομέα της γεννήτριας
- $T_{in}$  : Η ροπή εισόδου (Μηχανική ροπή που ασκείται στο κινητό μέρος της γεννήτριας)
- $T_{out}$  : Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας
- $b$  : Συντελεστής απωλειών (κυρίως λόγω τριβής)

Η αλλαγή του 'ω' έχει επίδραση στη γωνία ισχύος ως εξής:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_{sys} \quad (3.26)$$

Όπου  $\omega_{sys}$  η γωνιακή συχνότητα του συστήματος.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, είναι εφικτή μια αναπαράσταση της μεταβατικής ευστάθειας μιας σύγχρονης μηχανής υπό συγκεκριμένο φορτίο. Στην προκειμένη περίπτωση τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας και του φορτίου που θα χρησιμοποιηθούν φαίνονται στον πίνακα 3.1 και 3.2 αντίστοιχα.

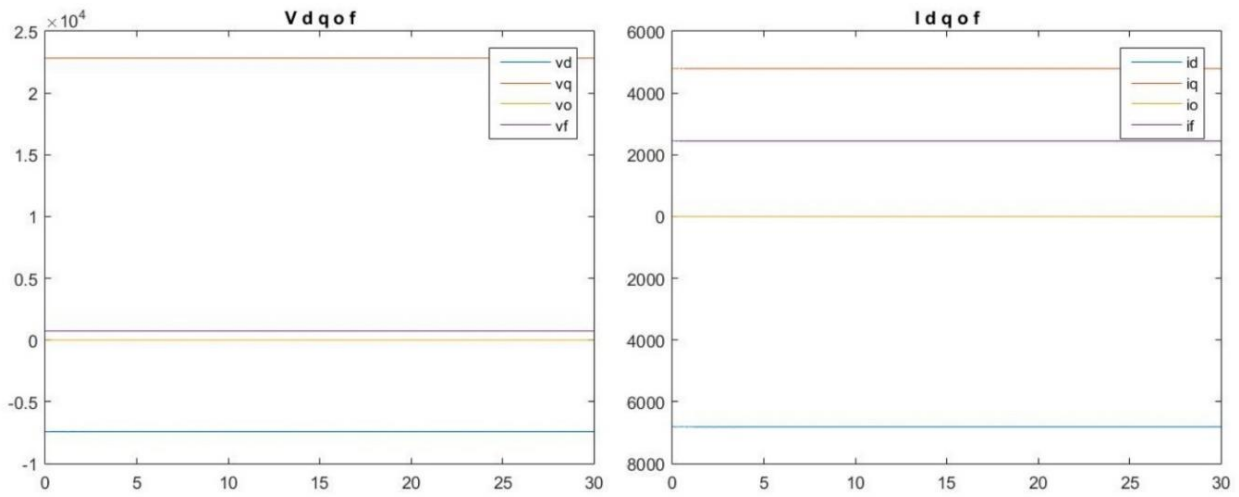
<b>Cylindrical Rotor (2 pole) Synchronous Generator</b>	
$S_{rated}$	635 MVA
$V_{rated}$	24 kV
$F_{rated}$	50 Hz
$M_s$	$1.65 \cdot 10^{-3} H$
$M_f$	$35.64 \cdot 10^{-3} H$
$L_s$	$3.32 \cdot 10^{-3} H$
$L_{ff}$	$584.64 \cdot 10^{-3} H$
$L_0$	$15 \cdot 10^{-3} H$
$R_s$	0.008 $\Omega$
$R_f$	0.3 $\Omega$

Πίνακας 3.1. Παράμετροι Σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα.

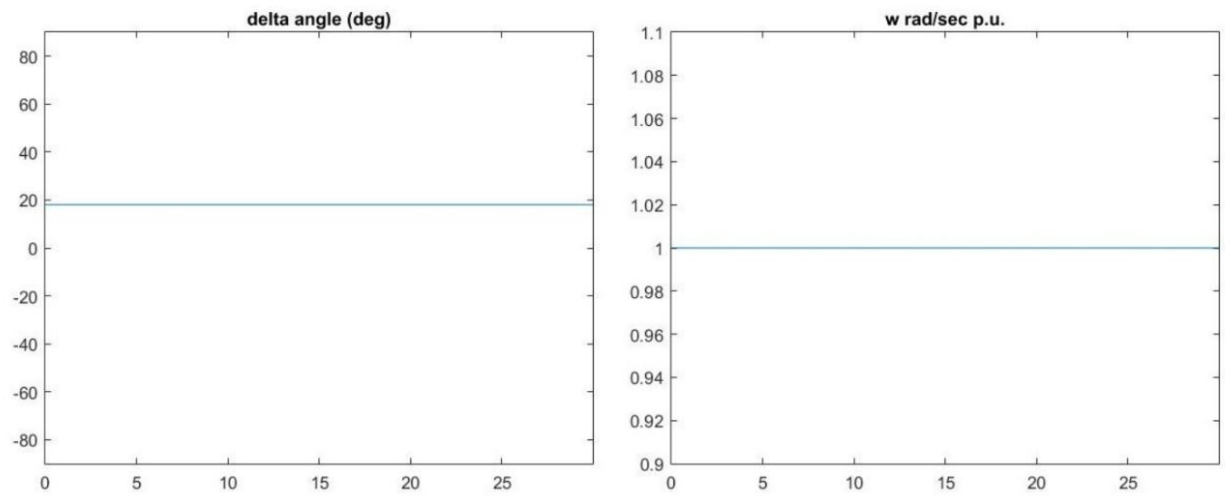
<b>Load</b>	
$S_{load}$	200 MVA
$\cos \varphi$	0.8 (inductive)
$V_{load}$	24 kV
$F_{load}$	50 Hz

Πίνακας 3.2. Παραμετροι Φορτίου.

Όταν η γεννήτρια του πίνακα 3.1 τροφοδοτεί το σταθερό φορτίο του πίνακα 3.2, το αποτέλεσμα είναι αυτό που αποτυπώνεται στις παρακάτω εικόνες.

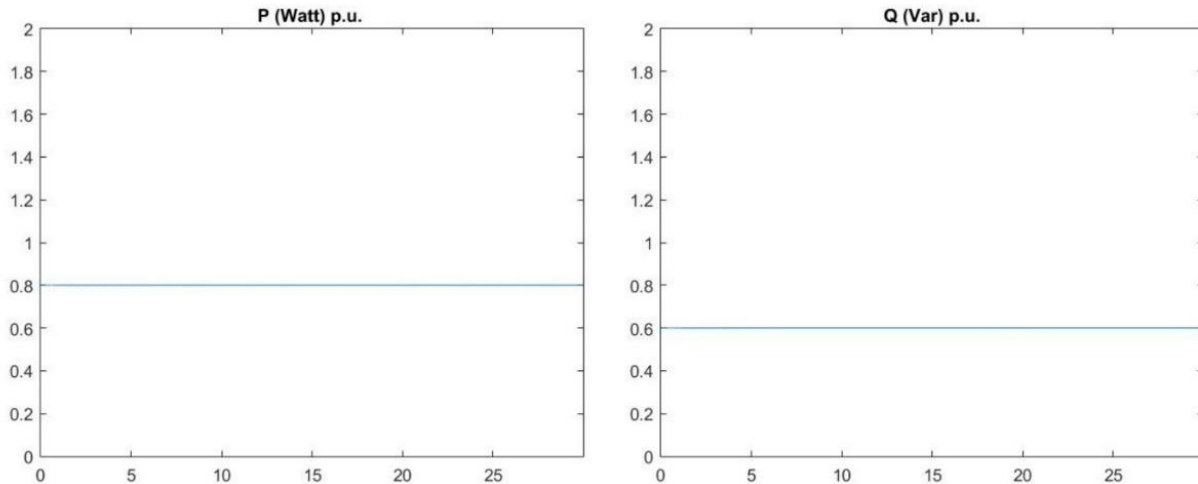


Εικόνα 3.11 Συνιστώσες τάσεων και ρεύματων στο dq0 στρεφόμενο πλαίσιο του μετασχηματισμού Park.



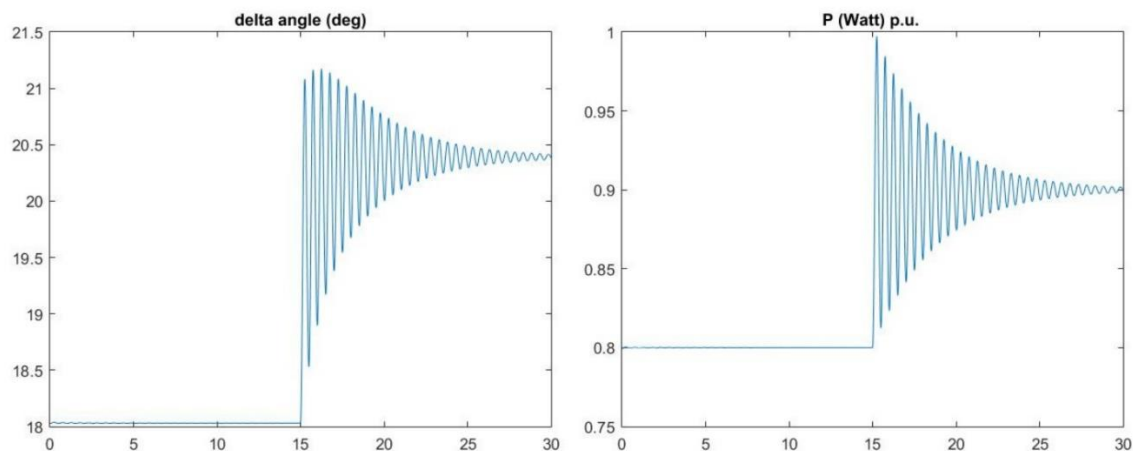
Εικόνα 3.12 Γωνία ισχύος 'δ' και γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ανα μονάδα



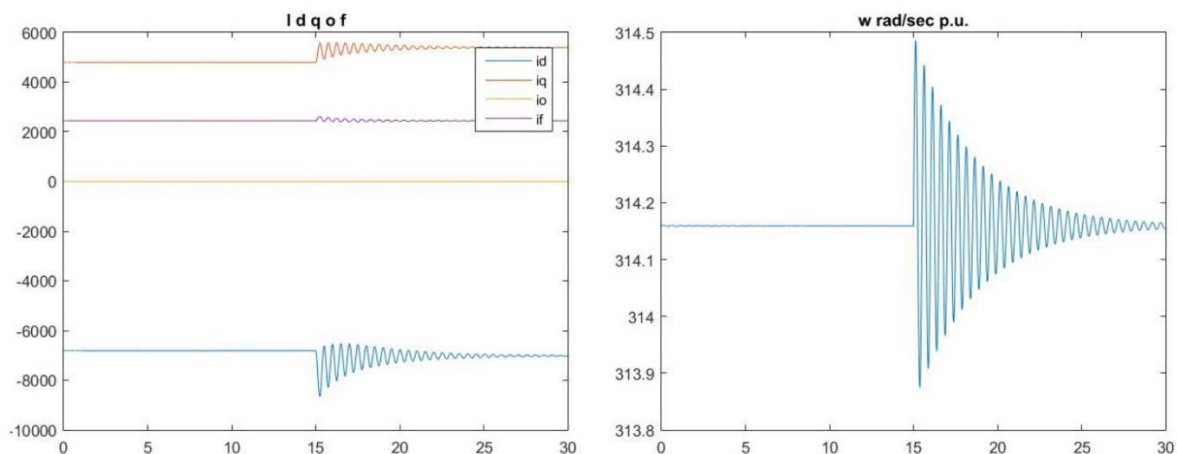


Εικόνα 3.13 Ανά μονάδα Ενεργός και Άεργος παραγόμενη ισχύς που απορροφά το φορτίο.

Καθώς η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας ξεπερνάει εύκολα τις απαιτήσεις του φορτίου παρατηρούμε πως δεν υπάρχουν ανεπιθύμητα φαινόμενα. Η γωνία  $\delta$  παραμένει σε χαμηλά επίπεδα και η παραγωγή απέχει πολύ από τον απυσυγχρονισμό. Ωστόσο είναι προφανές πως το φορτίο σπανίως είναι απολύτως σταθερό όπως αυτή τη περίπτωση. Στη πραγματικότητα το συνολικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από αυξομειώσεις του φορτίου οι οποίες μπορούν να φέρουν το σύστημα στις καταστάσεις ευστάθειας που αναφερθήκαν προηγουμένως. Όπως προαναφέρθηκε για να έχουμε λειτουργία γεννήτριας η ΗΕΔ πρέπει να προηγείται της τάσης  $V$  και η μεταξύ τους γωνία ονομάζεται γωνία  $\delta$ . Επίσης κατά τη τροφοδοσία φορτίου σταθερής τάσης, συμφωνά πάλι με τη 3. 20, υπάρχουν δύο τρόποι να αυξήσουμε τη παραγόμενη ισχύ ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας. Ο ένας τρόπος είναι να αυξήσουμε τη γωνία  $\delta$  και ο άλλος είναι να αυξήσουμε το ρεύμα διέγερσης συνεπώς και την ΗΕΔ  $E$  (συμφωνά με τη 3. 17). Στα παρακάτω διαγράμματα θα θεωρήσουμε πως στο μισό χρόνο του διαγράμματος γίνεται μια αύξηση της μηχανικής ισχύος στον άξονα της γεννήτριας κατά 20MW κρατώντας σταθερό το ρεύμα διέγερσης στον άξονα του δρομέα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 3.14 Γωνία ισχύος και παραγόμενη ενεργός ισχύς της γεννήτριας κατά την αύξηση της μηχανικής ισχύος στον άξονα της.

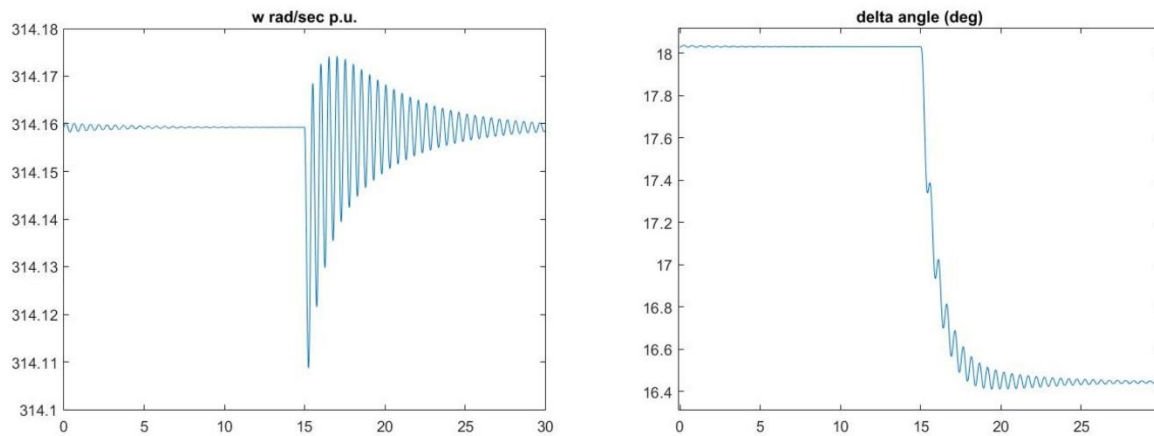


Εικόνα 3.15 Ρεύματα στάτη στο στρεφόμενο πλαίσιο του μετασχηματισμού Park και γωνιακή ταχύτητα δρομέα σύγχρονης γεννήτριας κατά την απότομη αύξηση της μηχανικής ισχύος στον άξονα της.

Σύμφωνα με τη 3.21 με την αύξηση της μηχανικής ισχύος θα έπρεπε να υπάρχει Σημαντική επιτάχυνση του δρομέα. Η επιτάχυνση αυτή δε παύει να υπάρχει ωστόσο λόγω της 3.22 υπήρξε αύξηση της γωνίας 'δ' καθώς το  $\omega$  προσπάθησε να ξεπεράσει το  $\omega_{sys}$  προκαλώντας θετική διάφορα στο δεξί σκέλος της εξίσωσης. Δηλαδή η μηχανή συγχρονίστηκε αλλάζοντας μονή της τη γωνία ισχύος 'δ'.

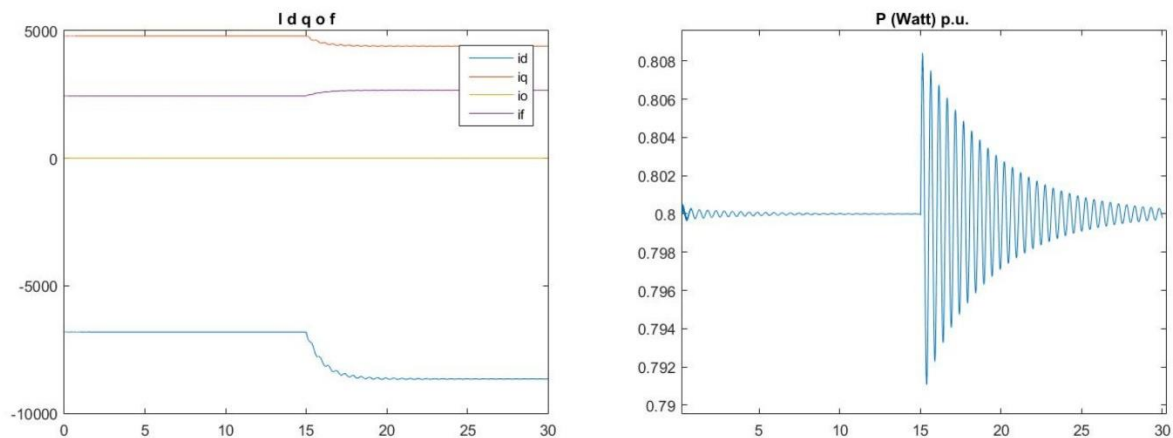
Μία ακόμα απόδειξη ότι η σύγχρονη γεννήτρια χαρακτηρίζεται πολύ καλά από το όνομα της είναι η προσομοίωση της απόκρισης της κατά την αύξηση του ρεύματος του δρομέα. Μια τέτοια αύξηση θα οδηγήσει σε ένα μαγνητικό πεδίο μεγαλύτερης έντασης. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι θα παραχθεί περισσότερη ισχύς. Στη πραγματικότητα αυτό που θα συμβεί είναι να μεταβληθεί η γωνία ισχύος 'δ' (δηλαδή η γωνία μεταξύ της ηλεκτρεγερτικής δύναμης και της τάσης που βλέπει ο στάτης). Με τη τροποποίηση της γωνίας 'δ' η σύγχρονη γεννήτρια τελικά θα παράξει

ισχύ ανάλογη της μηχανικής ισχύος που τις δίνεται και όχι του ρεύματος διέγερσης. Παρακάτω θα φανεί πως μεταβάλλονται τα μεγέθη της σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης με την αύξηση του ρεύματος διέγερσης όταν στο μισό του χρόνου προσομοίωσης αυξάνεται η τάση στο τύλιγμα του δρομέα.



Εικόνα 3.16 Γωνιακή ταχύτητα σύγχρονης γεννήτριας και γωνία ισχύος 'δ'.

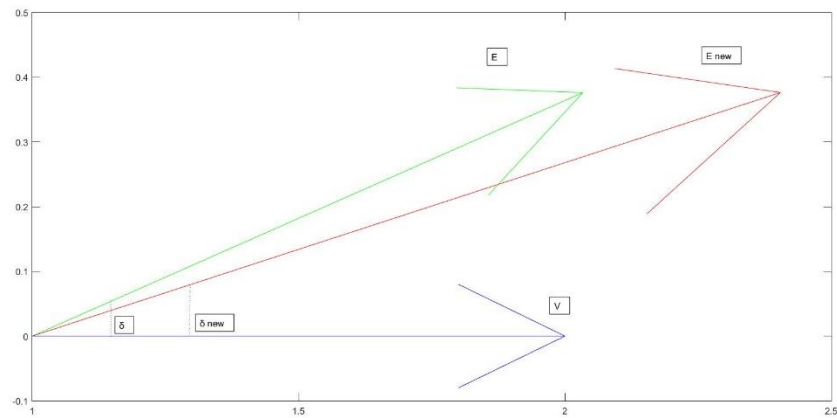
Η αύξηση του ρεύματος διέγερσης επιβαρύνει τη μηχανή με τη ζήτηση περισσότερης ισχύος. Η επιβάρυνση αυτή προσπαθεί να ρίξει τη ταχύτητα της μηχανής σύμφωνα με τη σχέση 3.25. Όμως λόγω της σχέσης 3.26 η γωνία 'δ' παίρνει τη κατάλληλη τιμή οθώντας τη παραγόμενη ενεργό ισχύ στα επίπεδα της μηχανικής.



Εικόνα 3.17 Ρεύματα στάτη και παραγόμενη ενεργός ισχύς σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης.

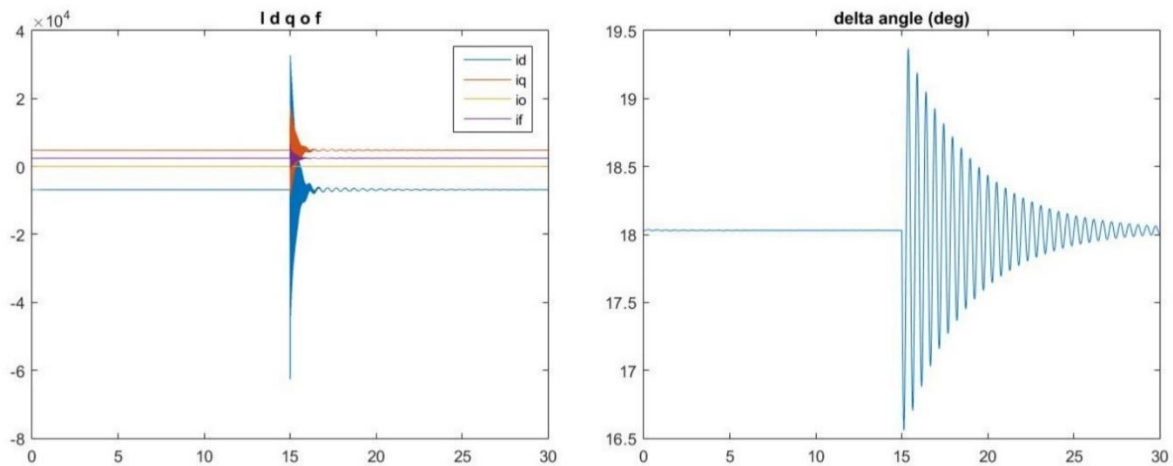
.Η αύξηση του ρεύματος διέγερσης αυξάνει και το μέτρο της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, πράγμα που σημαίνει ότι μεταξύ της γεννήτριας και της τάσης όπου αυτή βλέπει θα υπάρχει μεγαλύτερη

διαφορά δυναμικού κατά μέτρο. Όμως με τη προσαρμογή της γωνίας 'δ' η σχετική διαφορά δυναμικού παραμένει ίδια. Μια περιγραφική απεικόνιση φαίνεται παρακάτω.

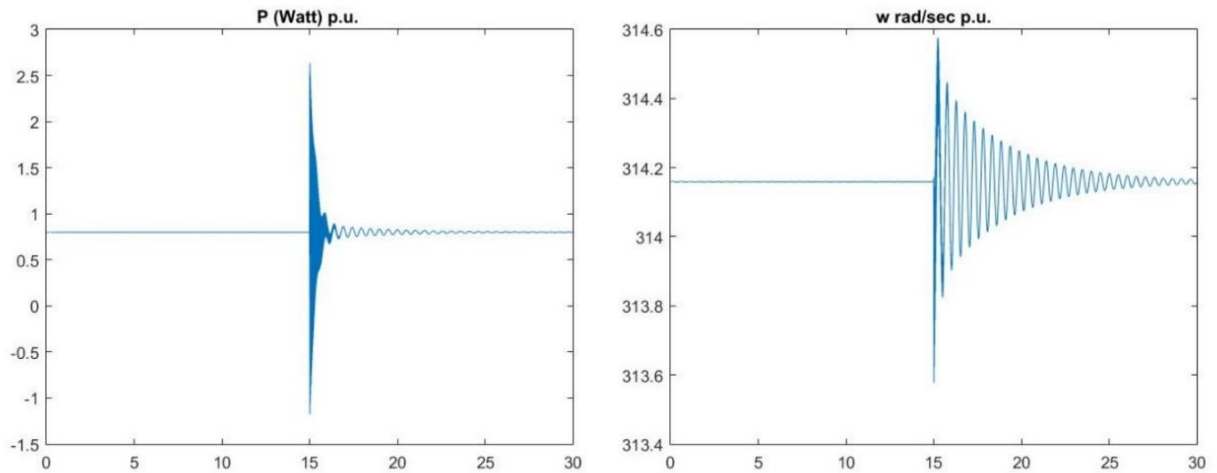


Εικόνα 3.18 Μεταβολή του διανύσματος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης κατά την αύξηση του ρεύματος πεδίου.

Στην ίδια γεννήτρια κατά το μισό του χρόνου λειτουργίας Θεωρούμε πως εμφανίζεται βραχυκύκλωμα μικρής διάρκειας στη φάση 'α' του τριφασικού τυλίγματος του στατη της γεννήτριας. Αυτό αποτελεί κλασικό πρόβλημα μεταβατικής ευστάθειας. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω.



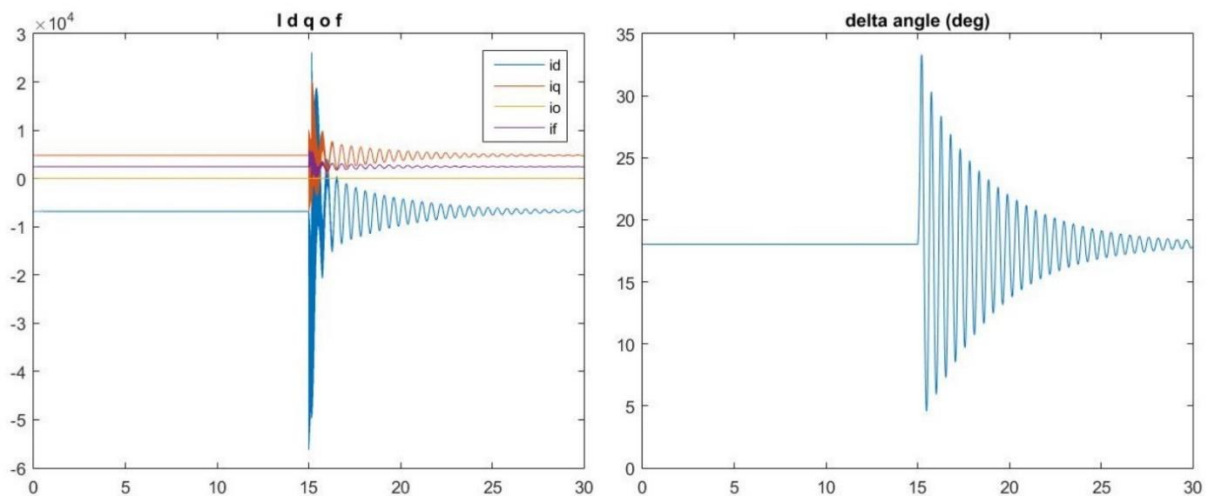
Εικόνα 3.19 Ρεύματα και γωνία ισχύος 'δ' της γεννήτριας έπειτα από μονοφασικό βραχυκύκλωμα μηδενιμού τάσης στη φάση 'α' του στάτη της γεννήτριας.



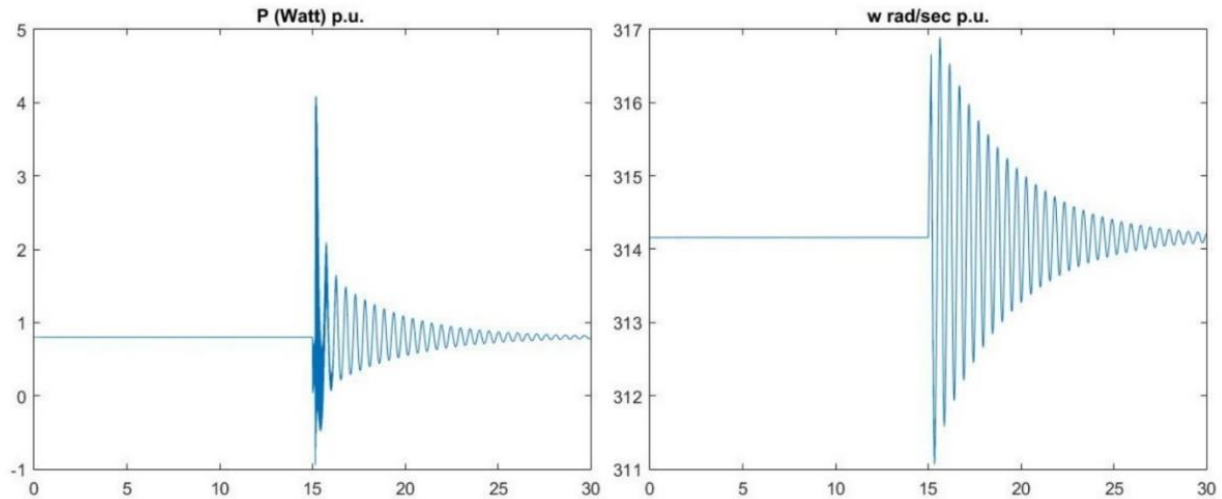
Εικόνα 3.20 Ενεργος ισχύς στατη και γωνιακή ταχύτητα δρομέα της γεννήτριας μετά το βραχυκυκλώμα.

Παρατηρούμε πως είναι εύστοχο να θεωρήσουμε τη σύγχρονη μηχανή ως ένα μετατροπέα ροπής-ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα και κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος σε μια από τις τρεις φάσεις του στάτη, η μηχανή έχοντας σταθερή μηχανική ισχύ μπορεί να σταθεροποιηθεί και να μετατρέψει μηχανικό έργο σε ηλεκτρικό.

Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και σε βυθίσεις τάσης και στις τρεις φάσεις του στατη. Στη περίπτωση αυτή έχουμε πτώση τάσης σχετικά μεγάλης διάρκειας κατά 10kV σε όλες τις φάσεις ενώ η μηχανική ισχύς διατηρείται σταθερή. Αυτό εμφανίζεται στα επόμενα διαγράμματα

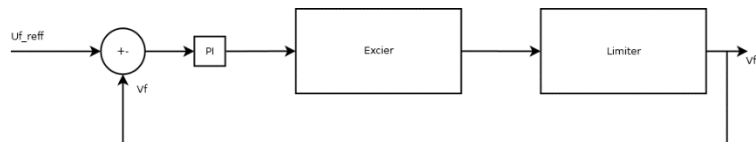


Εικόνα 3.21 Ρεύματα και γωνία ισχύος 'δ' της γεννήτριας έπειτα από πτώση τάσης κατά 10kV σεόλες τις φάσεις του στάτη.

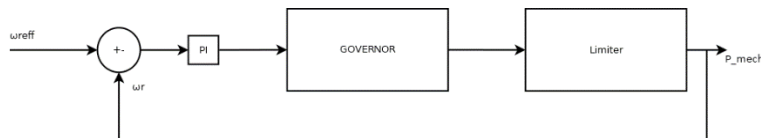


Εικόνα 3.22 Ενεργός ισχύς και γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας έπειτα από πτώση τάσης κατά 10kV στις φάσεις του στάτη.

Στις πιο εξελιγμένες γεννήτριες υπάρχουν συστήματα ελέγχου τάσης και γωνιακής ταχύτητας δρομέα. Το πρώτο σύστημα αυτομάτου ελέγχου προσαρμόζει τη τάση στο τυλίγμα του δρομέα ώστε να είναι εφικτός ο έλεγχος της ΗΕΔ. Με τον έλεγχο της ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι εφικτή η προσαρμογή της άεργου ισχύος της γεννήτριας. Το σύστημα ελέγχου της τάσης του δρομέα αναφέρεται ως Exciter στο μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας. Το σύστημα ρύθμισης γωνιακής ταχύτητας ουσιαστικά ρυθμίζει την ροή της πρωτογενούς ποσότητας (ατμός, νερό, αέρας) με σκοπό τη σταθεροποίηση των στροφών και συνεπώς την παραγωγή ποιοτικής ηλεκτρικής ισχύος υπό σταθερή συχνότητα[11]. Στη βιβλιογραφία το σύστημα αυτό αναφέρεται ως Governor[12].



Εικόνα 3.23 Απλοποιημένο σύστημα Exciter σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης[12].



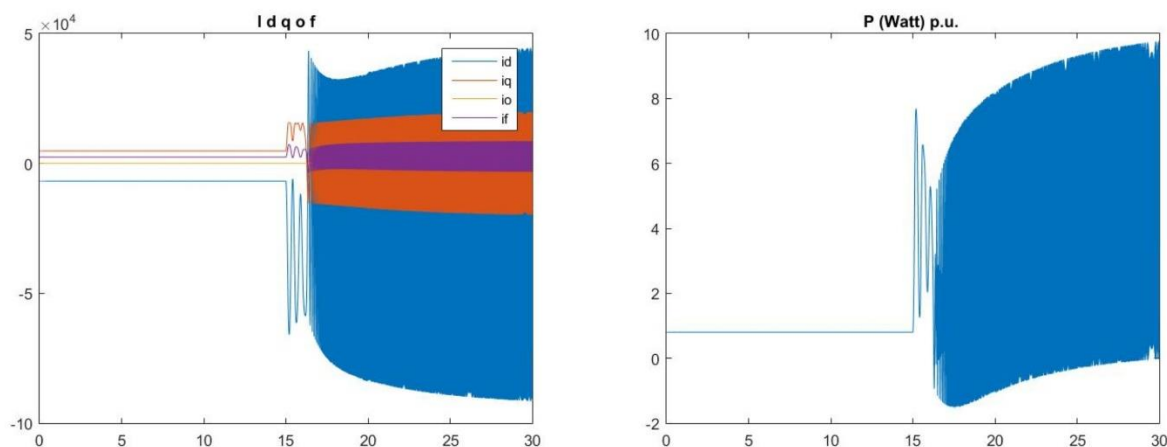
Εικόνα 3.24 Απλοποιημένο σύστημα Governor σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης[12].

Με μια απότομη αύξηση του φορτίου, το σύστημα exciter θα αυξήσει τη τάση διέγερσης του τυλίγματος του δρομέα. Ταυτόχρονα το σύστημα Governor θα αυξήσει τη ροή μηχανικής ισχύος στον άξονα περιστροφής (Παραδείγματος χάρι θα αυξηθεί η ροή ατμού στη περωτή μιας ατμομηχανής) αυξάνοντας έτσι τη ταχύτητα που αυτός περιστρέφεται. Καθ' αυτού η παραγόμενη

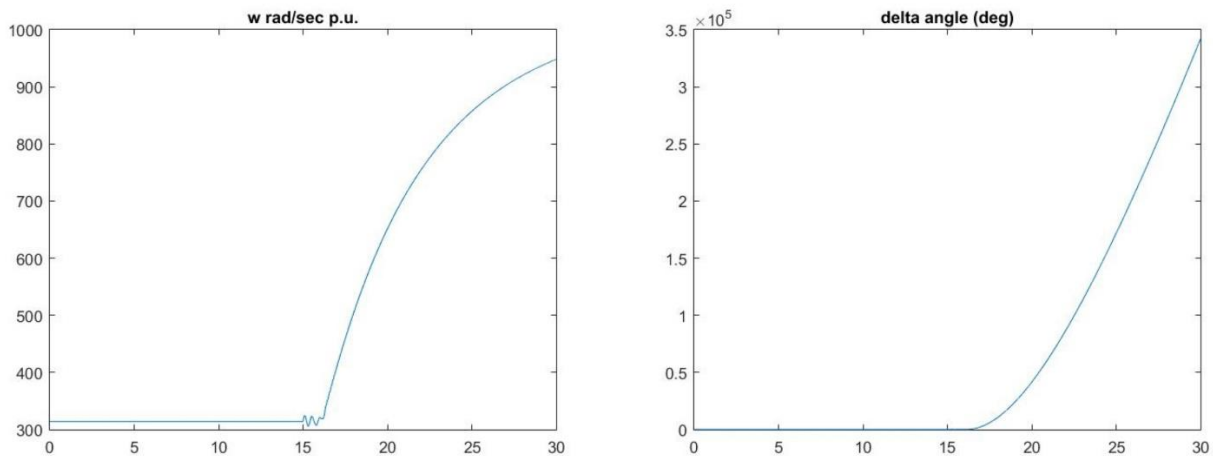
ισχύς θα ταυτιστεί με αυτή του φορτίου χωρίς να υπάρχουν προβλήματα. Όσον αφορά τις συμβατικές μονάδες η λειτουργία τους Συνήθως λειτουργεί με πρόγραμμα όπου οι τεχνικοί ορίζουν τις ποσότητες βάσει της ηλεκτρικής ισχύος που πρέπει να παραχθεί. Τα συστήματα ελέγχου και η παραγωγή υπολογίζεται από προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών και έτσι καθορίζεται το πρόγραμμα λειτουργίας[11]. Με λίγα λόγια είναι προτιμότερο στις συμβατικές μονάδες τα συστήματα ελέγχου να μην χρειάζεται να ενεργοποιηθούν και η παραγωγή να γίνεται βάσει προγράμματος[12].

Το ερώτημα που παραμένει ωστόσο είναι το τι συμβαίνει στη περίπτωση που η σύγχρονη γεννήτρια αποσυγχρονιστεί. Αν και δύσκολες, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η σύγχρονη γεννήτρια μπορεί να ξεφύγει από τα όρια ευστάθειας και τα αποτελέσματα να είναι καταστροφικά για τη μηχανή αλλά και το δίκτυο. Ένα παράδειγμα αποσυγχρονισμού είναι η αύξηση της γωνίας 'δ' πέραν των  $90^\circ$  με τη χρήση μηχανικής ισχύος πολύ μεγαλύτερης από την προβλεπόμενη τιμή που δέχεται η σύγχρονη μηχανή.

Στο παρακάτω παράδειγμα, στο μισό του χρόνου προσομοίωσης η μηχανική ισχύς παίρνει τιμή που ξεπερνά αρκετά αυτή της ονομαστικής. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3.25 Ρεύματα και ενεργός ισχύς σύγχρονης μηχανής σε περίπτωση αποσυγχρονισμού.



Εικόνα 3.26 Ταχύτητα δρομέα και δυνάμει ισχύος 'δ' σε περίπτωση αποσυγχρονισμού.

Σε περίπτωση αποσυγχρονισμού λοιπόν κρίνεται αναγκαία η άμεση αποσύνδεση της σύγχρονης μηχανής από το υπόλοιπο σύστημα καθώς από μια τέτοια απόκριση, πέραν της καταστροφής της ίδιας της μηχανής υπάρχει ο κίνδυνος κατάρρευσης του υπόλοιπου δικτύου. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την επιθυμία για λειτουργία σε χαμηλές γωνίες ισχύος υπό μεγάλη μηχανική αδράνεια στον άξονα ώστε η επέμβαση να μπορεί να είναι άμεση.

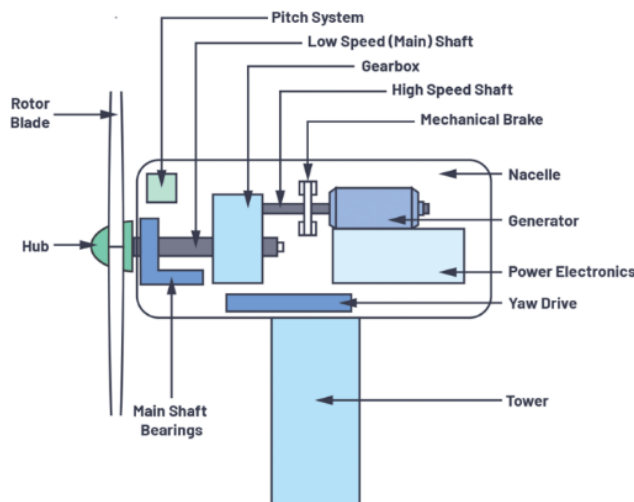
### 3.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι ηλεκτρικές μηχανές έχουν πολλές διαφοροποιήσεις και μπορούν να λειτουργούν ως κινητήρες και ως γεννήτριες. Όσον αφορά τις σύγχρονες μηχανές στη πληθώρα των περιπτώσεων λειτουργούν σαν μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού. Έχουν την ικανότητα να παράγουν ηλεκτρική ισχύ αδει, αλειπτα και με πολύ καλή ποιότητα ενώ αποτελούν ένα στιβαρό μέσο παραγωγής χάρη στα συστήματα ελέγχου που μπορούν να προσαρμοστούν σ'αυτές. Ακόμα και σε απότομες μεταβολές αυτές μπορούν να προσαρμοστούν κρατώντας ζωντανό το δίκτυο ενώ ταυτόχρονα έχουν και την ικανότητα αποφόρτισης των γραμμών μεταφοράς από την άεργο ισχύ που κυλάει σ'αυτή.



#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν τη βασική μέθοδο παραγωγής ισχύος με τη χρήση του άνεμου. Υπάρχουν πολλές διαφοροποιήσεις του τρόπου και του ελέγχου της λειτουργίας τους. Στη γενική περίπτωση μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από κάθετο πυλώνα στην κορυφή του οποίου τοποθετείται το σύστημα παραγωγής. Εκεί εγκαθίσταται ένας οριζόντιος άξονας (δρομέας ανεμογεννήτριας) ο οποίος φέρει πτερύγια με σκοπό την αλληλεπίδραση αυτών με τον άνεμο και συνεπώς την περιστροφή του άξονα. Μια μέθοδος ελέγχου της κίνησης του άξονα είναι και ο έλεγχος της γωνίας βήματος πτερυγίου. Αυτός με τη σειρά του μπορεί να ομαλοποιήσει την αποδοτικότητα της κίνησης περιορίζοντας ακραίες παροχές αιολικής ενέργειας στο σύστημα. Συνήθως ο αριθμός των πτερυγίων είναι δύο ή τρία. Με μια μικρή ανάλυση της αεροδυναμικής των πτερυγίων μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί πως η διάφορα στην απόδοση σε ανεμογεννήτριες δύο πτερυγίων σε σύγκριση με αυτή των τριών πτερυγίων είναι της τάξης του 6%. Όμως καθώς αποτελεί μια μακροχρόνια και στιβαρή κατασκευή η τάση για ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια είναι να είναι αυξητική. Η περιστροφή του άξονα χάρη στην αεροδυναμική των πτερυγίων είναι η βασική αρχή για την παραγωγή. Να σημειωθεί πως είναι σημαντική η τοποθέτηση φρενών για την ασφάλεια της λειτουργίας. Ο περιστρεφόμενος άξονας μπορεί να καταλήγει σε κιβώτιο ταχυτήτων ή να τροφοδοτεί τη δυναμική και κινητική του ενέργεια απευθείας στο δρομέα μιας γεννήτριας χωρίς επιπλέον άξονα υψηλής ταχύτητας λόγω του κιβωτίου. Η γεννήτρια με τη σειρά της μπορεί να είναι σύγχρονη με πολλούς ή λίγους πόλους ή ασύγχρονη. Ωστόσο η προσοχή στρέφεται στη χρήση σύγχρονων γεννητριών με μεγάλο αριθμό πόλων καθώς έτσι ανεμογεννήτρια έχει την ικανότητα να δουλεύει αποδοτικά σε χαμηλές στροφές ενώ ταυτόχρονα εξαλείφεται η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων για τον ίδιο λόγο. Προφανώς στο παραπάνω σύστημα εγκαθίστανται υψηλής ακρίβειας ανεμόμετρα και ανεμοδείκτες για τον καλύτερο έλεγχο της απόδοσης[11][7]. Ένα σύστημα ανεμογεννήτριας φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:

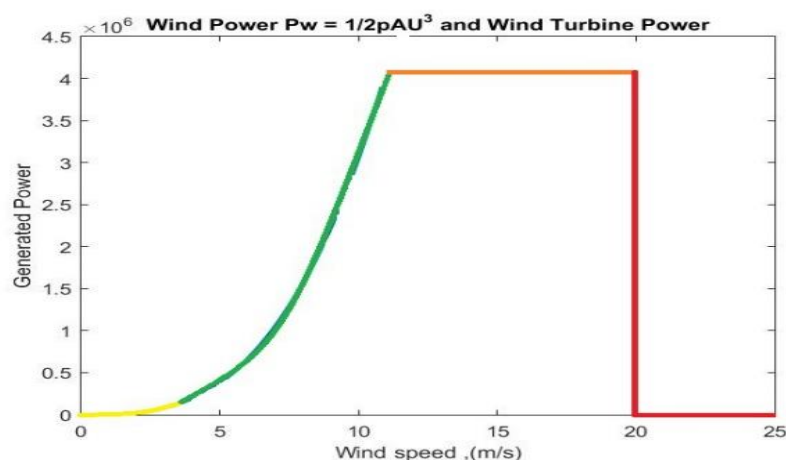


Εικόνα 4.1 Γενικό σύστημα ανεμογεννήτριας [17].

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από τη γεννήτρια του αιολικού συστήματος μπορεί να συνδεθεί απευθείας στο δίκτυο ή και να παρεμβάλλεται από μετατροπείς για την καλύτερη διαχείριση της. Πλέον η απευθείας σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο αποτελεί απαρχαιωμένη μέθοδο και τείνει να εξαφανιστεί σαν ιδέα. Προφανής λόγος της προτίμησης αυτής είναι η στοχαστική μεταβλητότητα του άνεμου και συνεπώς οι διαταραχές στη τάση και τη συχνότητα. Στη πληθώρα των σημερινών ανεμογεννητριών τοποθετούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς πριν τη τελική διασύνδεση στο δίκτυο. Με τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων η παραγωγή αρμονικών είναι αναπόφευκτη και συνεπώς σε μικρά συστήματα τοποθετούνται και φίλτρα εξόδου πριν τη τελική σύνδεση στο δίκτυο. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα γίνει λεπτομερής ανάλυση του συστήματος μιας ανεμογεννήτριας τριών πτερυγίων με πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών ελεγχόμενη από ηλεκτρονικά ισχύος. Στο μοντέλο αυτό θα γίνει προσομοίωση της παραγωγής και της μεταβατικής ευστάθειας ενός τέτοιου συστήματος (απόκριση σε πτώσεις τάσης, βραχυκυκλώματα κ. α.) [3] [7].

#### 4.2 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ – ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΛΑΒΗ ΙΣΧΥΟΣ

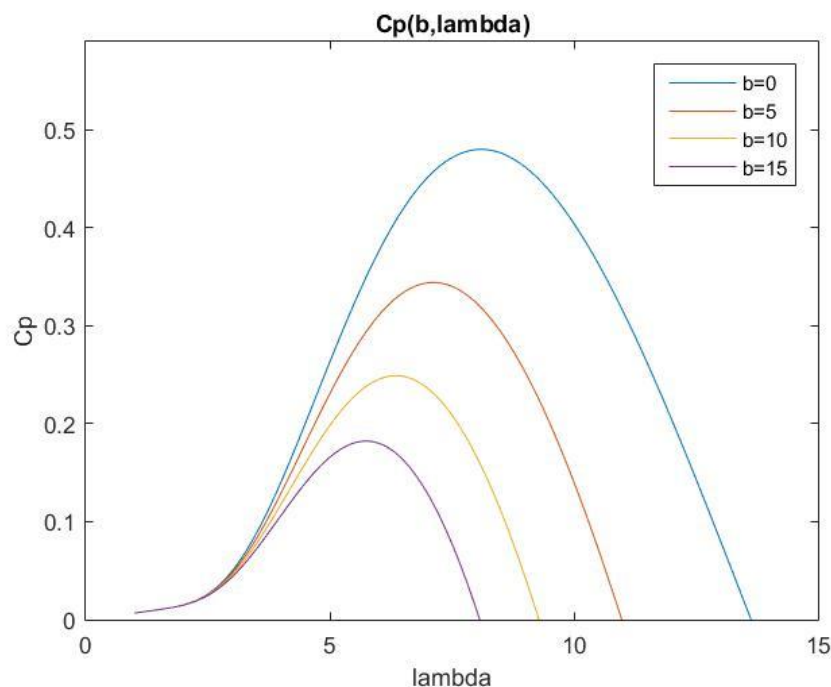
Το αεροδυναμικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας αποτελεί ίσως το αρχαιότερο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό των αιολικών συστημάτων. Στόχος του συστήματος είναι η απολαβή της ισχύος του άνεμου με τέτοιο τρόπο ώστε η παραγωγή να είναι βέλτιστη και με τις ελάχιστες δυνατές φθορές. Η τεχνική που Χρησιμοποιείται αναφέρεται ως MPPT (Maximum Power Point Tracking). Υπάρχουν πολλές μέθοδοι του τύπου MPPT αλλά η γενική ιδέα είναι η ίδια στη κάθε περίπτωση. Στόχος της τεχνικής αυτής είναι ο εντοπισμός του καλύτερου δυνατού σημείου λειτουργίας με σκοπό τη μέγιστη απολαβή ισχύος. Στη περίπτωση των αιολικών συστημάτων η τεχνική MPPT Χρησιμοποιείται με βάση το πηλίκο ταχύτητας ακροπτερυγίου προς ταχύτητας άνεμου. Δηλαδή το 'λ' που ορίστηκε και στο κεφάλαιο 2. Οι περιοχές λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας μπορούν να χωριστούν σε τέσσερα επίπεδα με βάση τη ταχύτητα άνεμου. Ως εκ τούτου ορίζονται οι Περιοχές εκκίνησης, βελτιστοποίησης, περιορισμού και αποκοπής όπως φαίνεται και στη παρακάτω εικόνα [3], [7].



Εικόνα 4.2 Περιοχές λειτουργίας ανεμογεννήτριας. Περιοχές εκκίνησης (κιτρινο), βελτιστοποίησης (πράσινο), περιορισμού (πορτοκαλί), απόκοπης (κόκκινο).

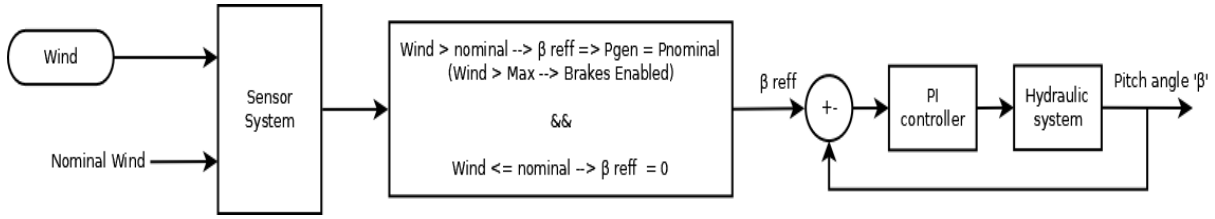
Προφανώς οι Περιοχές λειτουργίας ποικίλουν για κάθε σύστημα ανεμογεννήτριας. Αναφορικά η περιοχή εκκίνησης είναι εκείνη όπου η ταχύτητα του άνεμου δεν είναι αρκετή ώστε να παραχθεί ικανή ισχύς από το σύστημα. Η περιοχή βελτιστοποίησης είναι εκείνη όπου η απολαβή αιολικής ισχύος ρυθμίζεται ώστε να είναι η βέλτιστη. Αντίστοιχα στη περιοχή περιορισμού ενεργοποιείται το σύστημα γωνίας βήματος πτερυγίων για τον περιορισμό της απολαβής ισχύος (κυρίως για λογούς πρόληψης φθοράς του συστήματος) ενώ στη περιοχή αποκοπής λόγω των επικίνδυνα υψηλών ταχυτήτων άνεμου, η ανεμογεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο και ενεργοποιείται το σύστημα φρενών μαζί με το σύστημα γωνίας βήματος αποφεύγοντας έτσι πιθανές αστάθειες και καταστροφές [3], [7]. Παρατηρούμε λοιπόν πως είναι σημαντικός ο διαχωρισμός αυτός.

Ένα σημαντικό μέρος του συστήματος αποτελεί ο έλεγχος της γωνίας Pitch. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, η απολαβή του άνεμου εξαρτάται από το συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος  $C_p(\lambda, \beta)$  και οι διάφορες τιμές του μπορούν να φανούν στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.3 . Εξάρτηση του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος για τις διάφορες γωνίες βήματος ακροπτερυγίου συναρτήσει του λόγου ακροπτερυγίου.

Παρατηρούμε λοιπόν πως για γωνία βήματος  $\beta = 0$  ο αεροδυναμικός συντελεστής έχει τη μέγιστη τιμή και καθώς η γωνία 'β' αυξάνεται παρατηρείται πτώση στη τιμή του. Η τεχνική αύξησης της γωνίας βήματος πτερυγίου είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό σε περιοχές λειτουργίας. Στη περιοχή βελτιστοποίησης η γωνία  $\beta$  παραμένει σταθερή και ίση με  $\beta = 0^\circ$  ενώ στη περιοχή περιορισμού η γωνία  $\beta$  αυξάνεται μέχρι το όριο που θα ενεργοποιηθεί και το σύστημα φρενών. Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα διάγραμμα συστήματος για τον έλεγχο της γωνίας βήματος ακροπτερυγίου.



Εικόνα 4.4 Σύστημα αυτομάτου ελέγχου για τη ρύθμιση της γωνίας βήματος πτερυγίου μέσω υδραυλικού συστήματος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως με τον έλεγχο της γωνίας pitch ρυθμίζεται ταυτόχρονα και η γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Κατά τη περιοχή του περιορισμού, το σύστημα αυτομάτου ελέγχου της γωνίας βήματος ενεργοποιείται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασφάλιση της συνθήκης  $\omega_{rotor} = \omega_{nominal}$ . Τα διάφορα συστήματα μιας ανεμογεννήτριας Συνήθως έχουν άμεση ή έμμεση εξάρτηση από τα γειτονικά τους και συνεπώς μια πιο αναλυτική εξήγηση θα δοθεί έπειτα από την τελική διασύνδεση αυτών.

#### 4.3 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Κατά τη κατασκευή ενός συστήματος ανεμογεννήτριας υπάρχει η επιλογή της χρήσης ή μη κιβωτίου ταχυτήτων. Η τοποθέτηση του κιβωτίου έχει αποδειχθεί αξιόπιστη μέθοδος τροφοδότησης της κίνησης του δρομέα των πτερυγίων στη μηχανή. Όμως λόγω του αυξημένου κόστους, του βάρους και την απαίτηση της συντήρησης του, η χρήση ενός κιβωτίου τείνει να θεωρείται μη αποδοτική. Με τη χρήση πολυπολικών σύγχρονων γεννητριών είναι εφικτή η κατάργηση της χρήσης κιβωτίου ταχυτήτων ενώ η διασύνδεση του άξονα περιστροφής των πτερυγίων γίνεται απευθείας στο δρομέα της μηχανής[7].

Σύμφωνα λοιπόν με το κεφάλαιο 3 οι εξισώσεις που διέπουν τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών είναι οι εξής:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - poles \cdot \omega_r L_{qs} i_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + poles \cdot \omega_r L_{ds} i_{ds} + poles \cdot \omega_r \lambda_m \end{cases} \quad (4.1)$$

Ενώ η ενεργός και η άεργος ισχύς που παράγεται μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πως ισούται με:

$$\begin{cases} P_s = 3/2 (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = 3/2 (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (4.2)$$

Η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή στη σύγχρονη μηχανή είναι:

$$T_e = \frac{3}{2} poles (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (4.3)$$

Όπου με κατάλληλες μαθηματικές πράξεις και με βάση τα παραπάνω προκύπτει οτι:

$$T_e = \frac{3}{2} poles (\lambda_m i_{qs} + i_{ds} i_{qs} (L_{ds} - L_{qs})) \quad (4.4)$$

Παρατηρούμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή αποτελείται από δύο ορούς. Ο ένας είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή που παράγεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ του ρεύματος  $i_{qs}$  και των μονίμων μαγνητών και ο άλλος είναι η ροπή αντίδρασης που οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των επαγωγών  $L_{ds}$  και  $L_{qs}$ . Ωστόσο συνήθως  $L_{ds} = L_{qs}$  [7] [11].

Όσον αφορά το μηχανικό μέρος ισχύουν τα παρακάτω:

$$J_{gen} \frac{d\omega_r}{dt} = T_{mech} - T_e - \omega_r b \quad (4.5)$$

Όπου:

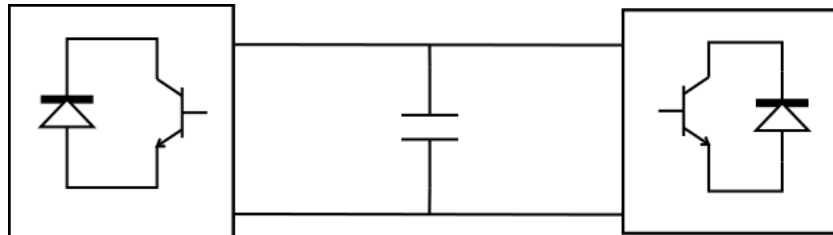
- $J_{gen}$  η ροπή αδράνειας του δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας
- $T_e$  η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας
- $T_{mech}$  η μηχανική ροπή στον άξονα της γεννήτριας
- $b$  ο συντελεστής μηχανικών τριβών που εξαρτάται από τα εξωτερικά μηχανικά χαρακτηριστικά.

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις είναι ικανές να περιγράψουν πλήρως τη λειτουργία μιας σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών στο σύγχρονα στρεφόμενο dq0 πλαίσιο αναφοράς και χρησιμοποιούνται για το πλήρες μοντέλο ανεμογεννήτριας με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής.

#### 4.4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Όπως ειπώθηκε και πριν, στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς. Καθ'αυτού η ευστάθεια και η παραγωγή βελτιστοποιούνται καθιστώντας την ανεμογεννήτρια ως ένα πολύ στιβαρό μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Πριν γίνει η ανάλυση των ηλεκτρονικών συστημάτων της ανεμογεννήτριας είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η λειτουργία των μετατροπέων αυτών.

Ένας γενικός τρόπος διαχείρισης της παραγόμενης ισχύος είναι η τεχνική της ανόρθωσης-αποθήκευσης-αντιστροφής. Κατά τη τεχνική αυτή η παραγόμενη ισχύς ανορθώνεται από εναλλασσόμενη με τη χρήση του μετατροπέα στη πλευρά της μηχανής, αποθηκεύεται σε πυκνωτή μεγάλης ισχύος όπου η τάση του τελευταίου τροφοδοτείται στον αντιστροφέα στη πλευρά του δικτύου. Ένα γενικό σύστημα το οποίο είναι και αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στη παρούσα εργασία, φαίνεται στη παρακάτω εικόνα[7]:

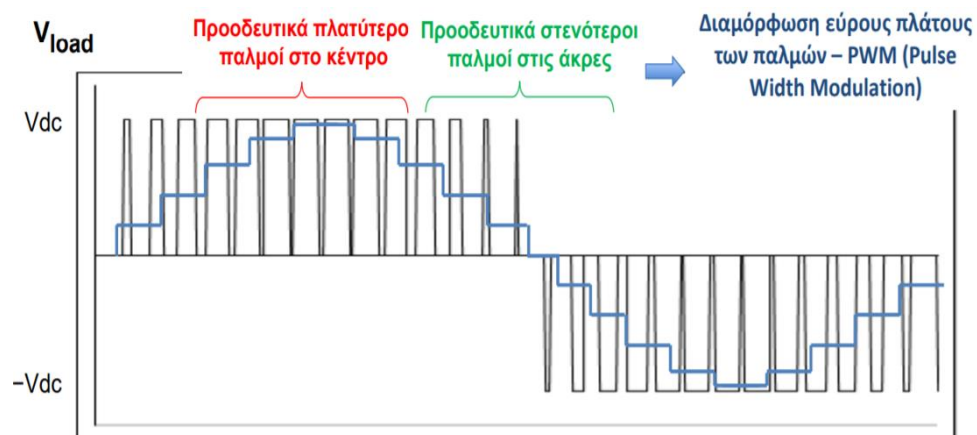


Εικόνα 4.5 Μετατροπέας ισχύος. Ανορθωτής-Πυκνωτής-Αντιστροφέας.

Είναι εύκολο από την ονομασία του κάθε ηλεκτρονικού μετατροπέα να γίνει κατανοητή η χρήση του. Ένας ανορθωτής δέχεται στην είσοδο του εναλλασσόμενη τάση και στην έξοδο του παράγει συνεχή. Όμως σε έναν πραγματικό ανορθωτή η τάση εξόδου αδυνατεί να είναι σταθερή. Συνεπώς είναι απαραίτητη η χρήση ενός στοιχείου ομαλοποίησης των μεγεθών όπως είναι ένας πυκνότης ή ένα πηνίο. Η χρήση του πυκνωτή είναι να αποθηκεύει ενέργεια και να συμβάλει στην ομαλοποίηση της εξόδου του ανορθωτή καθώς αυτή αδυνατεί να είναι τέλεια. Αντίστοιχα, ένας αντιστροφέας δέχεται στην είσοδο του συνεχή τάση και στην έξοδο του παράγει εναλλασσόμενη. Συμβαίνει όμως το εναλλασσόμενο μέγεθος της εξόδου του αντιστροφέα να φέρει μη επιθυμητά στοιχεία ταλάντωσης τα οποία αναφέρονται ως αρμόνικες. Η παραγωγή αρμονικών εξαρτάται σημαντικά από τον τρόπο τροφοδότησης του ελέγχου του αντιστροφέα ενώ ανάλογα την εφαρμογή, Σημαντική κρίνεται η ανάγκη τοποθέτησης χαμηλοπερατών φίλτρων στην έξοδο του μετατροπέα[3], [7].

Η μέθοδος που παρέχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια στον έλεγχο ενός συστήματος αντιστροφέων είναι η μέθοδος PWM. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή εφαρμόζεται κατάλληλη διακοπτική τεχνική ώστε το παραγόμενο μέγεθος να έχει βασική αρμονική συνιστώσα την επιθυμητή κυματομορφή ενώ το υπόλοιπο αρμονικό περιεχόμενο μπορεί εύκολα να αποκοπεί.

Μια επεξηγηματική απεικόνιση φαίνεται παρακάτω.

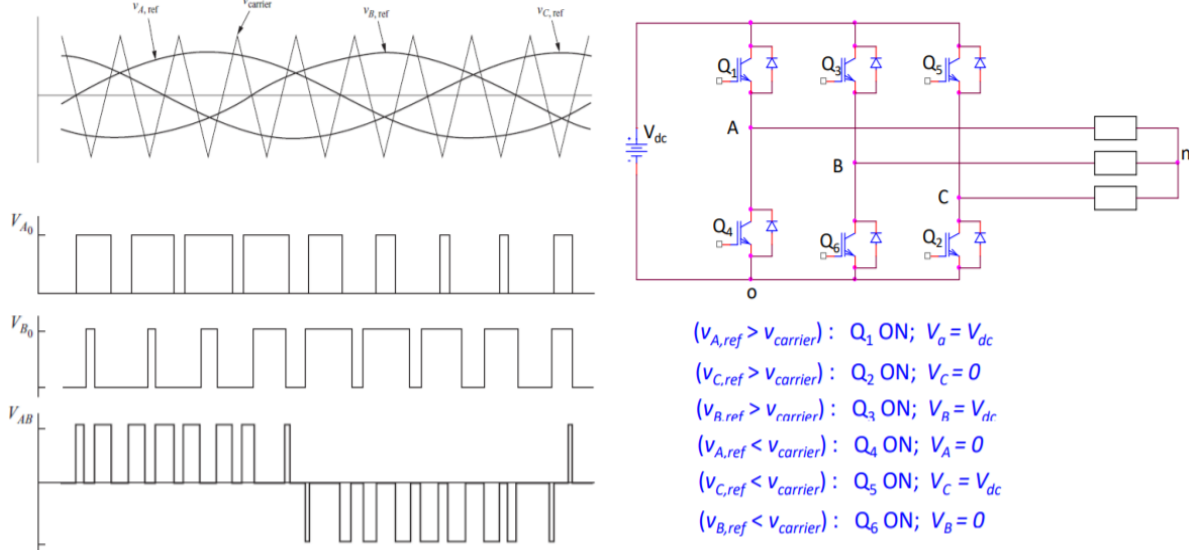


Εικόνα 4.6 Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου PWM.

Η παραπάνω μέθοδος Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του πλάτους και της συχνότητας της τάσης εξόδου ενός αντιστροφέα. Σε ένα τριφασικό PWM κύκλωμα χρησιμοποιούνται τρία σήματα ελέγχου (ένα για κάθε φάση) και ένα κοινό φέρον σήμα. Τα τρία σήματα ελέγχου συγκρίνονται με το φέρον. Όταν το κάθε σήμα ελέγχου είναι μεγαλύτερο από το φέρον, η είσοδος του

διακοπτικού στοιχείου που τροφοδοτείται, εμφανίζεται στην έξοδο. Μια καλή περιγραφή μπορεί να φανεί στο παρακάτω σχήμα.

### Τριφασικοί Αντιστροφείς (PWM)



Εικόνα 4.7 Σχηματική επεξήγηση της μεθόδου PWM σε τριφασικό αντιστροφέα.

Τέλος για την εύρυθμη λειτουργία ορίζουμε δύο δείκτες διαμόρφωσης.

- Δείκτης διαμόρφωσης συχνότητας:  $m_f = \frac{f_{triangular}}{f_{reference}}$
- Δείκτης διαμόρφωσης πλάτους:  $m_a = \frac{Vm_{reference}}{Vm_{triangular}}$

Το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της τάσης  $V_0$  είναι ανάλογο του  $m_a$  και  $V_1 = m_a V_{DC}$ . Αντίστοιχα με το δείκτη  $m_f$  μπορούμε να ελεγχουμε τις συχνότητες των παραγόμενων αρμονικών. Οι πρώτες αρμονικές εμφανίζονται περί της  $m_f$ -οστης αρμονικής (διπολικό διακοπτικό σχήμα) και της  $2m_f$ -οστης αρμονικής (μονοπολικό διακοπτικό σχήμα). Και στις δύο περιπτώσεις οι αρμονικές βρίσκονται αρκετά μακριά της βασικής αρμονικής. Οπότε για να βελτιωθεί ο δείκτης Total Harmonic Distortion (THD) της τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί φίλτρο με υψηλότερη συχνότητα απόκοπης αρα και μικρότερου μεγέθους καταλήγοντας έτσι σε εύκολοτερο φιλτράρισμα αρμονικών[6].

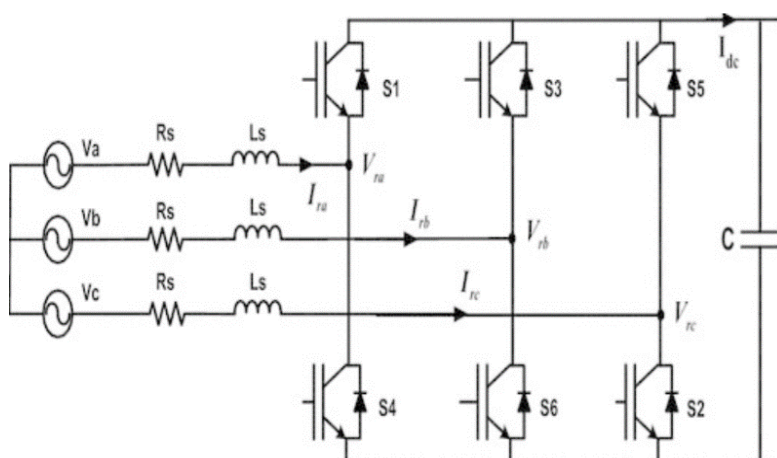
Συνοψίζοντας, σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου PWM είναι:

- Η μετατόπιση των αρμονικών σε υψηλές συχνότητες (Χρήση μικρότερων φίλτρων).
- Το πλάτος και η συχνότητα της τάσης εξόδου μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα και πολύ αποτελεσματικά.
- Επιφέρει μεγάλη μείωση στο συντελεστή Total Harmonic Distortion (THD) του ρεύματος του φορτίου.



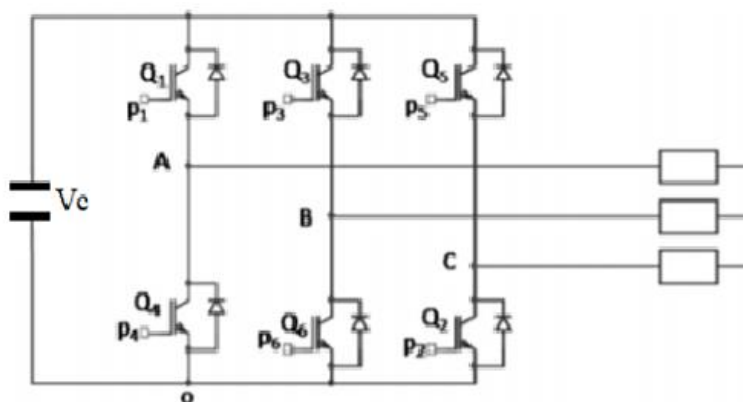
#### 4.5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΠΛΕΥΡΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.

Τόσο οι δίοδοι όσο και τα θυρίστορ ή τρανζίστορ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση ενός ανορθωτή (rectifier). Η πιο τυπική λύση είναι ο ανορθωτής γέφυρας με διόδους λόγω της απλότητας του, του χαμηλού κόστους και των μικρών απωλειών. Ο μετατροπέας αυτός όμως είναι μη γραμμικός με αποτέλεσμα την παραγωγή αρμονικών ρεύματος. Επιπλέον επιτρέπει τη ροή ισχύος μόνο προς τη μια κατεύθυνση. Τέλος δεν έχει την ικανότητα έλεγχου ρεύματος και τάσης. Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη χρήση ελεγχόμενων ημιαγωγών ισχύος και την επιλογή της κατάλληλης τεχνικής για τη παλμοδότηση τους. Χρησιμοποιούμε λοιπόν έναν ανορθωτή που λειτουργεί με τη μέθοδο PWM που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ένας τέτοιος ανορθωτής σε συνδυασμό με τριφασικά τυλίγματα εισόδου (τυλίγματα στάτη ηλεκτρικής μηχανής) φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.8 PWM ανορθωτής σε συνδυασμό με τριφασικά τυλίγματα και πυκνωτή ομαλοποίησης της εξόδου.

Από την άλλη μεριά βρίσκεται ο μετατροπέας στη πλευρά του δίκτυου. Εκεί χρησιμοποιείται τριφασικός PWM αντιστροφέας. Ένα τέτοιο κύκλωμα φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.9 PWM αντιστροφέας στη πλευρά του δίκτυου. Τα παραλληλόγραμμα συμβολίζουν τις σύνθετες αντιστάσεις των φίλτρων εξόδου προς το δίκτυο.



Όπου ισχύουν τα παρακάτω:

- P1 λειτουργεί όταν  $V_a > V_{carrier}$
- P2 λειτουργεί όταν  $V_c > V_{carrier}$
- P3 λειτουργεί όταν  $V_b > V_{carrier}$
- P4 λειτουργεί όταν  $V_a < V_{carrier}$
- P5 λειτουργεί όταν  $V_c < V_{carrier}$
- P6 λειτουργεί όταν  $V_b < V_{carrier}$

Στην έξοδο λοιπόν θα παρατηρηθεί μια τάση που θα έχει την εξής μορφή:



Εικόνα 4.10 Έξοδος Α φάσης τριφασικού αντιστροφέα με τροφοδότηση PWM.

Όπως είναι αναμενόμενο το μέγεθος της εξόδου δεν είναι απόλυτως ημιτονοειδές αλλά φέρει διακυμάνσεις.

Το ουσιαστικό κομμάτι του μετατροπέα αυτού είναι να ελέγχει την τάση εισόδου της γεννήτριας με σκοπό η τελευταία να παράγει το επιθυμητό ρεύμα. Με την επίλυση της σχέσης 4. 1 ως προς το ρυθμό μεταβολής των ρευμάτων προκύπτει η εξής σχέση για τα ρεύματα στον d και q άξονα αντίστοιχα. Η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας θεωρείται ίση με 0 καθώς Θεωρούμε πως η γεννήτρια τροφοδοτείται με συμμετρικά τριφασικά μεγέθη[11]. Συνεπώς:

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{L_{ds}} (-R_s i_{ds} + poles \cdot \omega_r L_{qs} i_{qs} + v_{ds}) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{L_{ds}} (-R_s i_{qs} - poles \cdot \omega_r L_{ds} i_{ds} - poles \cdot \omega_r \lambda_m + v_{qs}) \end{cases} \quad (4.6)$$

Ωστόσο εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί πως το μοντέλο των εξισώσεων 4. 6 εμφανίζει έντονη μη-γραμμικότητα καθιστώντας έτσι τον έλεγχο των ρευμάτων σχεδόν μη εφικτό. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με τη τεχνική του μετασχηματισμού εισόδου όπως φαίνεται με τη παρακάτω ανάθεση:

$$\begin{cases} u_{ds} = poles \cdot \omega_r L_{qs} + v_{ds} \\ u_{qs} = -poles \cdot \omega_r L_{ds} i_{ds} - poles \cdot \omega_r \lambda_m + v_{qs} \end{cases} \quad (4.7)$$

Με την ανάθεση αυτή η σχέση 4.6 μετασχηματίζεται σε:

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{L_{ds}}(-R_s i_{ds} + u_{ds}) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{L_{ds}}(-R_s i_{qs} + u_{qs}) \end{cases} \quad (4.8)$$

Οπότε χρησιμοποιώντας τη τεχνική του μετασχηματισμού εισόδου στη σχέση 4. 6, το αποτέλεσμα είναι δύο γραμμικές εξισώσεις πρώτης τάξης οι οποίες είναι και πλήρως ανεξάρτητες. Γι τον έλεγχο των επιθυμητών ρευμάτων λοιπόν μπορούμε να δώσουμε τις κατάλληλες τιμές στις τάσεις  $u_{ds}$  και  $u_{qs}$ . Ωστόσο ο έλεγχος που εφαρμόζεται δε θα είναι απευθείας πάνω στη τάση αλλά πάνω στους δείκτες της PWM ανόρθωσης του μετατροπέα στη πλευρά της μηχανής. Οι δείκτες αυτοί κατά τη προσομοίωση στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο dq0 του μετασχηματισμού Park, παίρνουν την εξής μορφή:

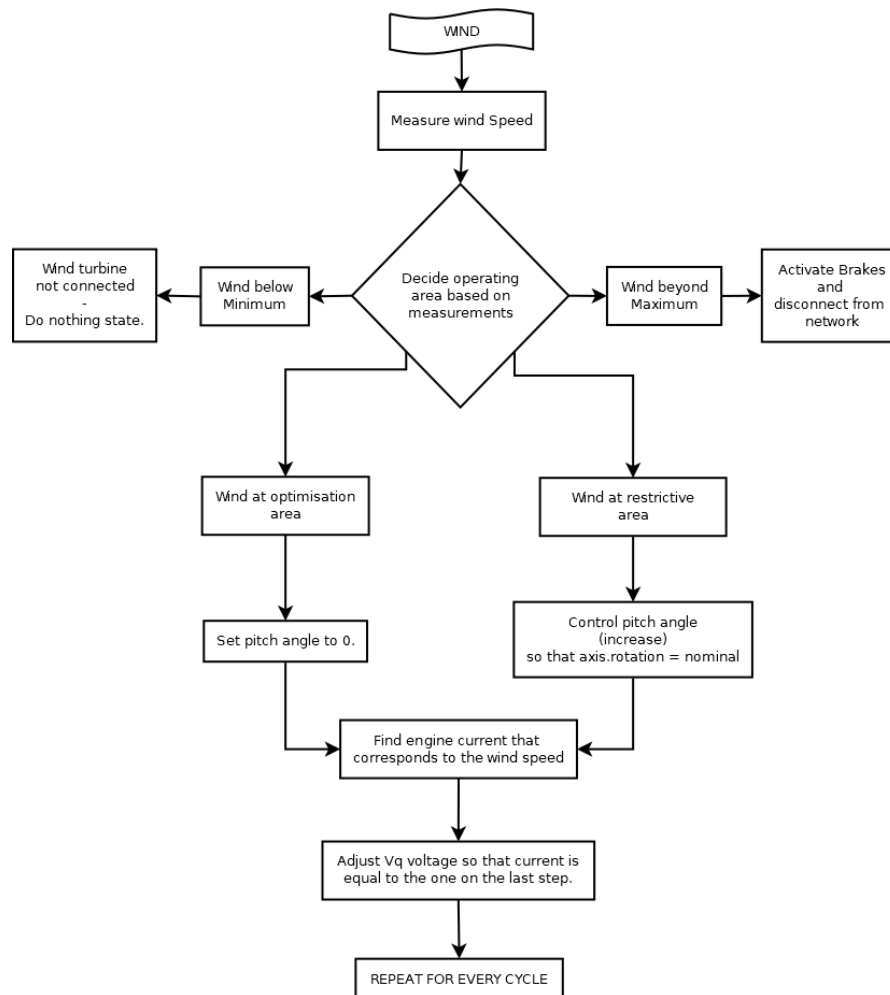
$$\begin{cases} m_{ds} = \frac{v_{ds}}{V_{DC}} = \frac{(u_{ds} - poles \cdot \omega_r L_{qs} i_{qs})}{V_{DC}} \\ m_{qs} = \frac{v_{qs}}{V_{DC}} = \frac{(u_{qs} + poles \cdot \omega_r L_{ds} i_{ds} + poles \cdot \omega_r \lambda_m)}{V_{DC}} \end{cases} \quad (4.9)$$

Όπως παρατηρούμε με τον έλεγχο των μεταβλητών  $m_{ds}$  και  $m_{qs}$  μπορούνε να ελέγξουμε την τάση την οποία θα βλέπουν οι εξισώσεις της γεννήτριας μονίμων μαγνητών. Ο έλεγχος γίνεται με δύο εν'σείρα PI ελεγκτές και το  $i_{qs}$  και έναν μόνο του για το  $i_{ds}$ . Ο ένας ελεγκτής του  $i_{qs}$  ελέγχει την ταχύτητα πετιρστροφης και παράγει τη τιμή αναφορά του επόμενου ελεγκτή. Η τιμή αναφοράς είναι το σήμα  $i_{qs_{ref}}$ . Το σήμα αυτό είναι η μια εκ των δύο εισόδων του επόμενου PI ελεγκτή στον οποίο ελέγχουμε το  $m_{qs}$  ώστε το ρεύμα  $i_{qs}$  να είναι αυτό για το οποίο η ροπή που θα παραχθεί να μας εξασφαλίζει τη συνθήκη  $\omega_r = \omega_{opt}$ . Το ρεύμα  $i_{ds}$  το προωθούμε να είναι ίσο με μηδέν. Ο λόγος είναι γιατί δε θέλουμε να υπάρχει ρεύμα στον d άξονα καθώς δημιουργείται ροπή η οποία δεν είναι <<πρόθυμη>>. Πιο συγκεκριμένα, η ροπή αυτή είναι η ροπή μαγνήτησης και μπορεί να παρομοιαστεί με την αλληλεπίδραση ενός μαγνήτη με ένα μεταλλικό αντικείμενο. Η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να δημιουργήσει αστάθεια στη ροπή του σιστηματος και συνεπώς είναι κάτι το οποίο θέλουμε να εξαλείψουμε. Το πλήρες σύστημα ελέγχου των ρευμάτων μπορεί να φανεί στην παρακάτω εικόνα[7].



ρύθμιση των PI ελεγχτών και συγκεκριμένα στη τιμή αναφοράς που πρέπει να πάρει το ρεύμα  $i_{qs}$  ώστε η τιμή του ρεύματος εγκάρσιου άξονα να αντιστοιχεί σε μια ηλεκτρική ροπή για την οποία ταυτόχρονα η αιολική ισχύς λαμβάνεται σε βέλτιστο βαθμό. Ουσιαστικά προστείνεται ένας ακόμα ελεγκτής με αρνητικό σφάλμα και θεωρείται πως ο ελεγκτής εύρεσης του βέλτιστου ρεύματος  $i_{qs}$  έχει πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα απο τον αμέσως επόμενο του μετατροπέα στη πλευρά της γεννήτριας.

Ένα επιφανειακό διάγραμμα του αλγόριθμου ρύθμισης του ελεγκτή στη πλευρά της μηχανής φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.12 Περιγραφή της ροής που ακολουθεί ο ελεγκτής στη πλευρά της μηχανής σε συγχρονισμό με τον έλεγχο της γωνίας pitch.

Μια αντίστοιχη διαδικασία με το μετατροπέα στη πλευρά της μηχανής, λαμβάνεται και για τον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου. Με τη διαφορά όμως ότι στη περίπτωση αυτή λαμβανουμε υπόψιν και τα φίλτρα εξόδου. Με βάση λοιπόν όσα ειπώθηκαν παραπάνω για το μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου οι σχέσεις που δίνουν τα ρεύματα όταν η τάση του δικτύου είναι ευθυγραμμισμένη με τον q-άξονα, είναι οι εξής:

$$\begin{cases} \frac{di_{df}}{dt} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_{df} + \omega_s L_f i_{qf} - v_{df}) \\ \frac{di_{qf}}{dt} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_{qf} - L_f i_{df} - v_{qf} + U_{grid}) \end{cases} \quad (4.10)$$

Όπως και στη περίπτωση του μετατροπέα στη πλευρά της μηχανής, παρατηρούμε πως οι εξισώσεις αυτές χαρακτηρίζονται από έντονη μη γραμμικότητα. Συνεπώς με ανάλογη χρήση του μετασχηματισμού εισόδου, η μη γραμμικότητα θα εξαλειφθεί ως εξής.

Θέτουμε:

$$\begin{cases} u_{df} = \omega_s L_f i_{df} - v_{df} \\ u_{qf} = -\omega_s L_f i_{df} - v_{df} + U_{grid} \end{cases} \quad (4.11)$$

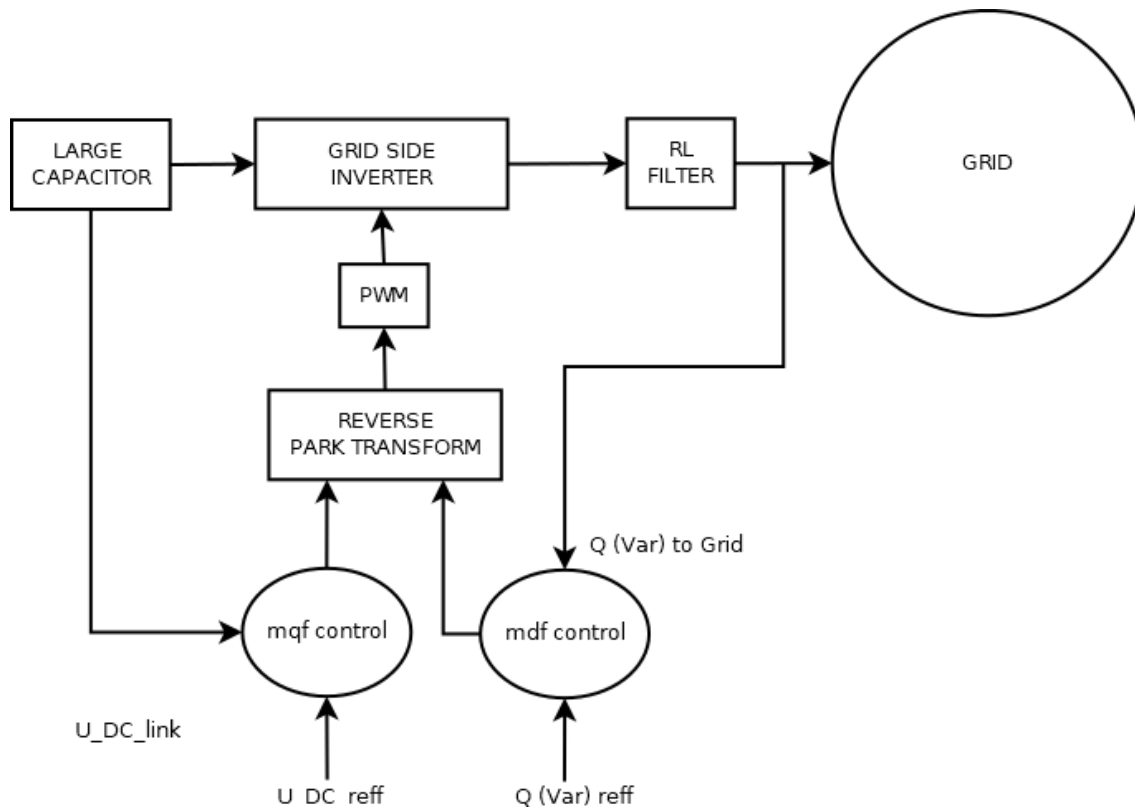
Οπότε με αντικατάσταση στην εξίσωση (4.10) θα προκύψουν οι εξής γραμμικές πλέον εξισώσεις

$$\begin{cases} \frac{di_{df}}{dt} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_{df} + u_{df}) \\ \frac{di_{qf}}{dt} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_{qf} - u_{qf}) \end{cases} \quad (4.12)$$

Παρατηρούμε λοιπόν πως με τον έλεγχο των μεταβλητών  $u_{df}$  και  $u_{qf}$ , μπορούμε να ελέγξουμε τα ρεύματα  $i_{df}$  και  $i_{qf}$  αντίστοιχα. Αυτό θα έχει άμεσο αντίκτυπο στη λαμβάνουσα ενεργό και άεργο ισχύ. Ο έλεγχος των μεταβλητών  $u_{df}$  και  $u_{qf}$  λαμβάνει χώρα πάνω στα σήματα ελέγχου  $m_{df}$  και  $m_{qf}$  αντίστοιχα. Τα σήματα αυτά είναι οι είσοδοι στο μοντέλο του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου και ισχύει ότι.

$$\begin{cases} m_{df} = \frac{v_{df}}{V_{DC}} = \frac{(-u_{df} + \omega_s L_f i_{qf})}{V_{DC}} \\ m_{qf} = \frac{v_{qf}}{V_{DC}} = \frac{(-u_{qf} + \omega_s L_f i_{df} - U_{grid})}{V_{DC}} \end{cases} \quad (4.13)$$

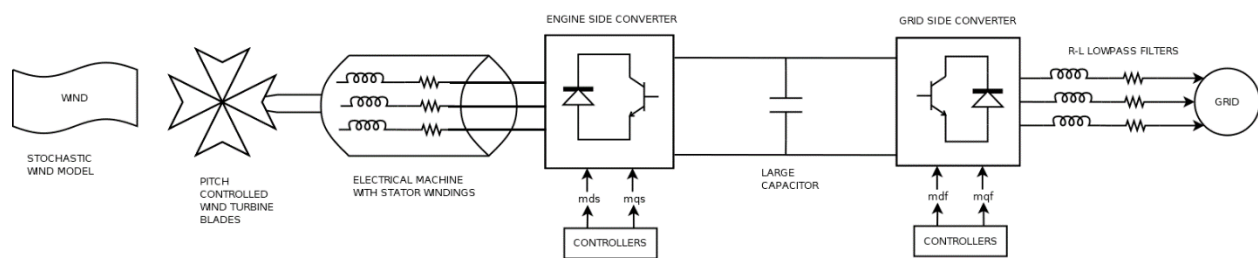
Οπότε με βάση όλα τα παραπάνω, για τον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου δημιουργήθηκε το εξής σχηματικό διάγραμμα του αυτόματου ελέγχου για των μεταβλητων  $m_{df}$  και  $m_{qf}$  αντίστοιχα.



Εικόνα 4.13 Σύστημα ανεμογεννήτριας στη πλευρά του δικτύου.

Όπως έχει προαναφερθεί ο έλεγχος αυτός μοιάζει πολύ με τον έλεγχο του μετατροπέα στη πλευρά της γεννήτριας. Αυτό που προσπαθούμε είναι να διατηρήσουμε τη σταθερή τάση στον πυκνωτή της DC διασύνδεσης ενώ ταυτόχρονα να έχουμε την ικανότητα ελέγχου της προσδιδόμενης άεργου ισχύος. Η ρύθμιση της άεργου ισχύος γίνεται με τον έλεγχο του ρεύματος του d-άξονα.

Επομένως η πλήρης γενική συνδεσμολογία μπορεί εύκολα να αναπαρασταθεί στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.14 Πλήρες Απλοποιημένο σύστημα ανεμογεννήτριας.

#### 4.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Όπως έχει προαναφερθεί ο έλεγχος αυτός μοιάζει πολύ με τον έλεγχο του μετατροπέα στη πλευρά της γεννήτριας. Αυτό που προσπαθούμε είναι να διατηρήσουμε τη σταθερή τάση στον πυκνωτή της DC διασύνδεσης ενώ ταυτόχρονα να έχουμε την ικανότητα ελέγχου της προσδιδόμενης άεργου ισχύος. Η ρύθμιση της άεργου ισχύος γίνεται με τον έλεγχο του ρεύματος του d-άξονα. Έχοντας λάβει υπόψη όλα τα παραπάνω είναι εφικτή μια προσομοίωση της απόκρισης του συστήματος για τις διάφορες μεταβολές του άνεμου αλλά και τις αστάθειες που μπορεί να προκύψουν από το ίδιο το δίκτυο. Στη συνέχεια λοιπόν θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μιας ανεμογεννήτριας με τα χαρακτηριστικά του παρακάτω πίνακα.

Ανεμογεννήτρια		
Ονομαστική ισχύς	$P_{nominal}$	2 MW
Ακτινα πτερυγίων	R	35 m
Ονομαστική Ταχύτητα Άνεμου	$U_{wind,nominal}$	12.5 m/s
Ταχύτητα Έναρξης	$U_{wind,cut\ in}$	4 m/s
Ταχύτητα απόξευξης	$U_{wind,cut\ off}$	25 m/s
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	$\omega_{nominal}$	2.26 r/s
Ροπή Αδρανείας	H	$3.675 \cdot 10^4\ kg \cdot m^2$
Συντελεστής τριβών	$b_{friction}$	$0.005\ N \cdot ms/rad$

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας

Σύγχρονη Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών		
Ονομαστική Ισχύς	$P_{nominal}$	2 MW
Ονομαστική Πολική Τάση	$U_{nominal}$	690 V
Ονομαστική συχνότητα λειτουργίας	$f_{nominal}$	9.75 Hz
Αριθμός ζευγων πόλων	Poles	26
Μαχνητική ροή μονίμων μαγνητών	$\lambda_m$	5.8264 Wb (rms)
Αντίσταση τυλιγμάτων στατή	$R_{stator}$	0.821 mΩ
Αυτεπαγωγή στατή στον άξονα d	$L_d$	1.5731 mH
Αυτεπαγωγή στατή στον άξονα q	$L_q$	1.5731 mH

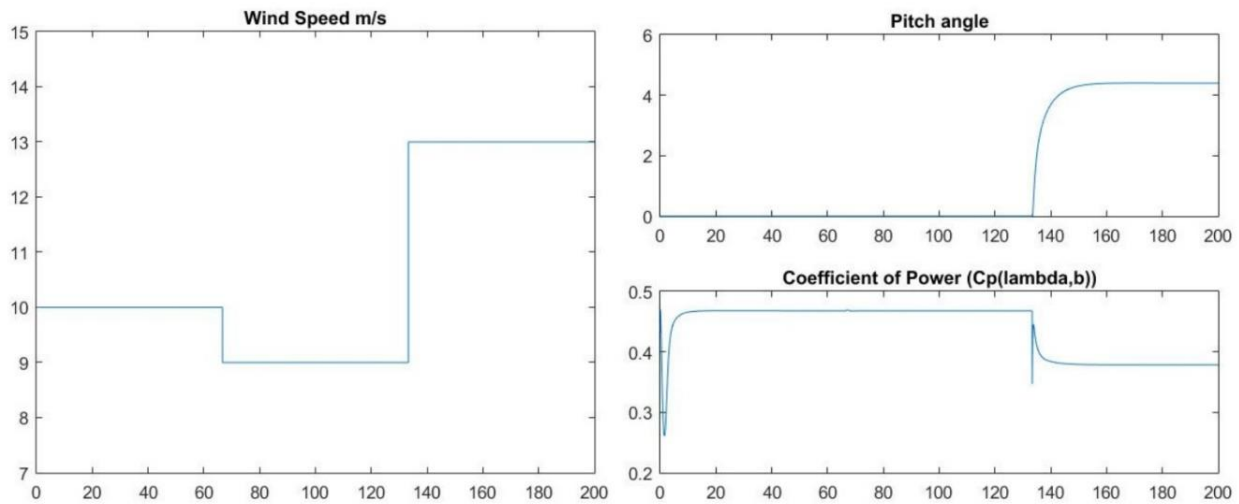
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά Σύγχρονης Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών.

Δίκτυο Διασύνδεσης Α/Γ		
Ονομαστική φασική τάση	$U_{grid}$	690 V
Ονομαστική συχνότητα	$f_{grid,nominal}$	50 Hz
Αντίσταση RL φίλτρου	$R_{filter}$	40 mΩ
Αυτεπαγωγή RL φίλτρου	$L_{filter}$	1 mH

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά Φίλτρων και Δίκτυου.

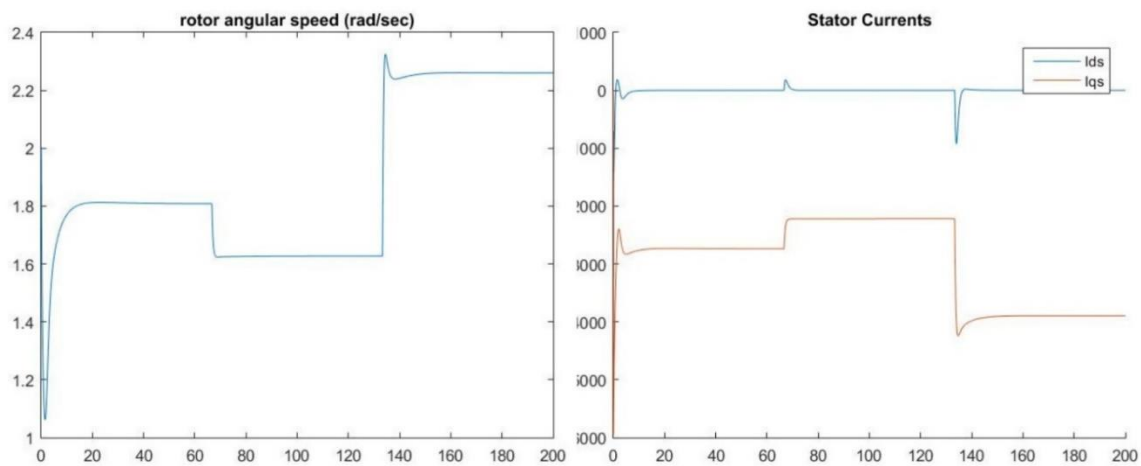
Ως επιπλέον χαρακτηριστικά πρέπει να αναφερθούν ο πυκνωτής της DC διασύνδεσης ο οποίος έχει τιμή χωρητικότητας  $C = 100\ mF$  και ονομαστικής τάσης  $V_{DC,nominal} = 1800V$ . Επίσης σημαντική είναι η αναφορά της διαφοροποίησης του αεροδυναμικού συντελεστή  $C_p$  η τιμή του οποίου εξαρτάται από τις μεταβλητές  $c_{1-6}$ . Οι τελευταίες έχουν άμεση εξάρτηση από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και διαμορφώνονται ανάλογα. Στη περίπτωση μας ισχύει ότι  $c_1 = 0.2324, c_2 = 116, c_3 = 0.4, c_4 = 5, c_5 = 13.2, c_6 = 0.0068$ . Οπότε σύμφωνα με τη σχέση (2.3.4) θα προκύψει ότι  $C_{p,max} \approx 0.468$  και  $\lambda_{opt} \approx 6.55$ .

Με τις προδιαγραφές αυτές, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 4.15 Ταχύτητα άνεμου (αριστερά) και συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος μαζί με τη μεταβολή της γωνίας pitch (αριστερά).

Η ταχύτητα άνεμου έχει τρεις διακυμάνσεις. Στα 10 m/s και στα 9 m/s η γωνία pitch παραμένει στις 0° όπου είναι και η γωνία για την οποία βελτιστοποιείται και ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος  $C_p$ . Στη μεταβολή της ταχύτητας του άνεμου από τα 9 m/s στα 13 m/s παρατηρούμε την αναμενόμενη αύξηση στη γωνία pitch με αποτέλεσμα να μειωθεί και ο συντελεστής  $C_p$ .

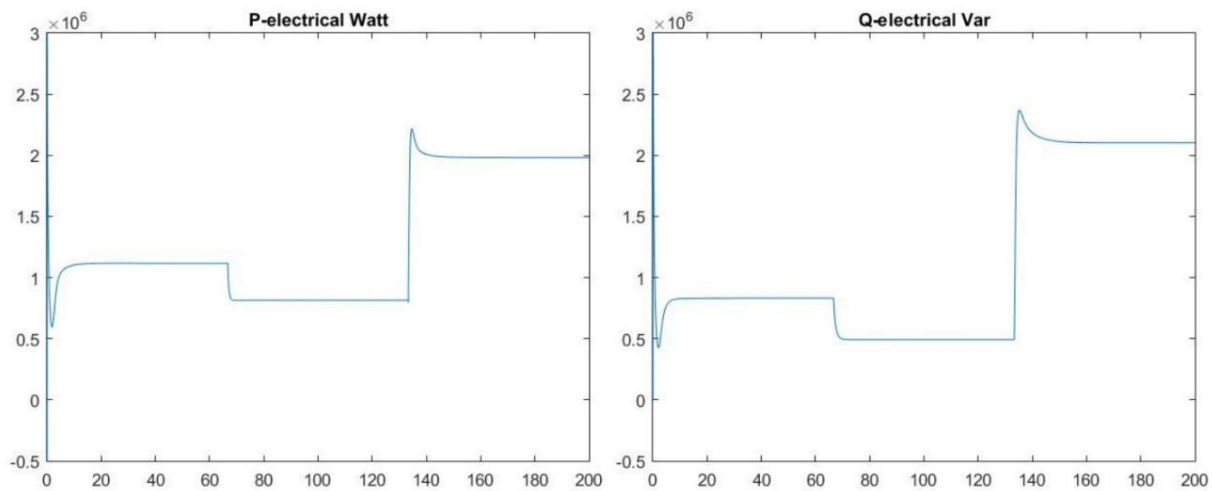


Εικόνα 4.16 Γωνιακή ταχύτητα δρομέα και ρεύματα στάτη.

Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα των πτερυγίων (άρα και της μηχανής καθώς δεν παρεμβάλλεται από κιβώτιο ταχυτήτων) ακολουθεί τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του άνεμου

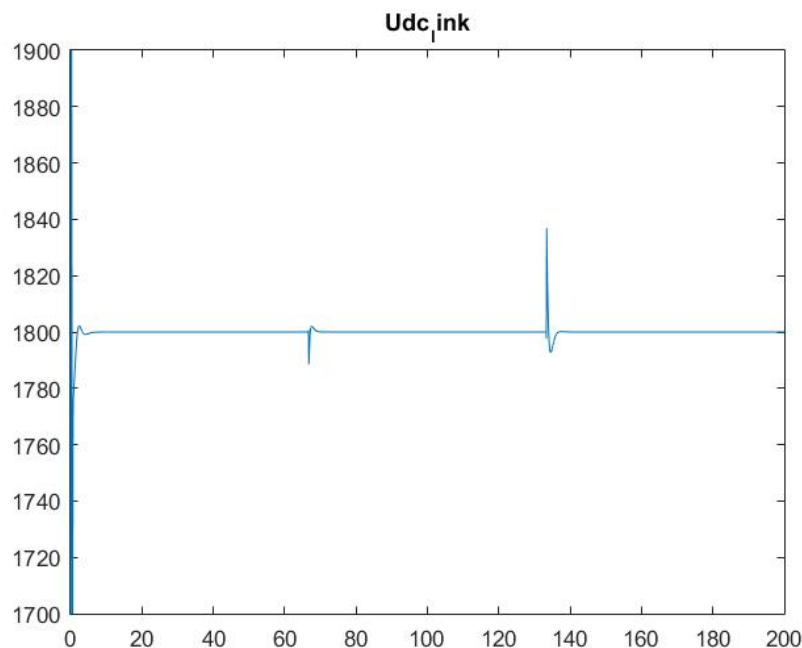


διατηρώντας όμως τον φραγμό της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής. Όπως προβλέπεται, η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων διατηρείται σταθερή στα 2.26 rad/sec.



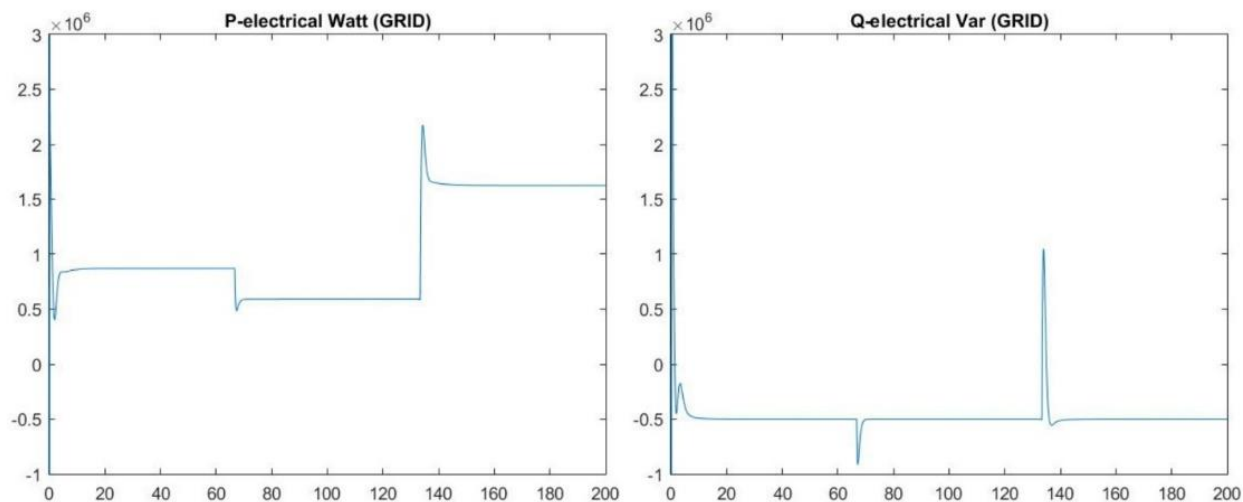
Εικόνα 4.17 Ενεργος και Άεργος Ισχύς που παράγεται από τη σύγχρονη μηχανή.

Όσον αφορά την παραγόμενη ενεργο και άεργο ισχυ της μηχανής, αυτή φαίνεται στα παραπάνω σχήματα. Τα μεγέθη που απαρτίζουν την ισχύ του εναλλασσόμενου ρεύματος θα μετατραπούν σε μεγέθη σταθερού ρεύματος τα οποία θα συμβάλλουν στην απόθηκευση φορτίου στη DC διασύνδεση. Είναι ανεμμενόμενο πως με τις ακαριαίες μεταβολές του άνεμου θα υπάρχουν διαταραχές στην τάση του πυκνωτή της DC διασύνδεσης όπως φαίνεται και παρακάτω:



Εικόνα 4.18 Τάση του πυκνωτή της DC διασύνδεσης.

Η τάση της DC διασύνδεσης είναι και αυτή που βλέπει ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου. Ο τελευταίος θα αντλήσει όσο περισσότερη ισχύ μπορεί από τον πυκνωτή με τη συνθήκη όμως της διατήρησης της τάσης του στη τιμή αναφοράς  $U_{DC_{ref}}$ . Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω.



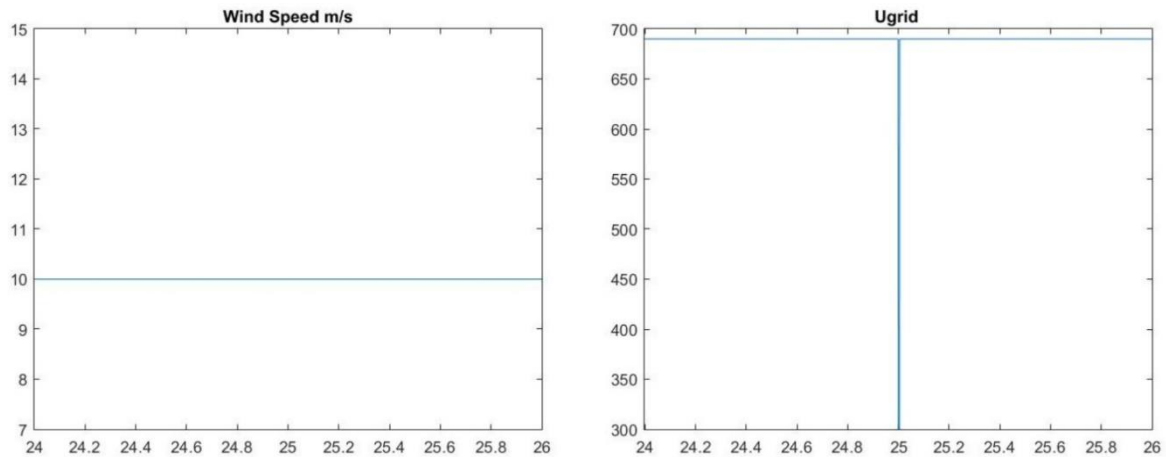
Εικόνα 4.19 Προσδοκώμενη στο δίκτυο Ενεργός και Άεργος ισχύς.

Σημαντική είναι η παρατήρηση της τιμής της άεργου ισχύος. Με τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων είναι εφικτός ο έλεγχος της άεργου ισχύος όπου στη προκείμενη περίπτωση ρυθμίστηκε να έχει αρνητικές τιμές. Δηλαδή μια ανεμογεννήτρια έχει την ικανότητα απορρόφησης άεργου ισχύος από το δίκτυο. Η ικανότητα αυτή μπορεί να εντοπισθεί και με τη χρήση σύγχρονων μηχανών οι οποίες λειτουργούν σαν κινητήρες για την απορρόφηση της άεργου ισχύος. Όμως με τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων και τον έλεγχο των μεταβλητών  $m_{df}$ ,  $m_{qf}$  ρυθμίζεται η άεργος ισχύς σε τιμές απορρόφησης ενώ η λειτουργία παραμένει στιβαρή ακόμα και σε ακαριαίες μεταβολές του άνεμου.

#### 4.7 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

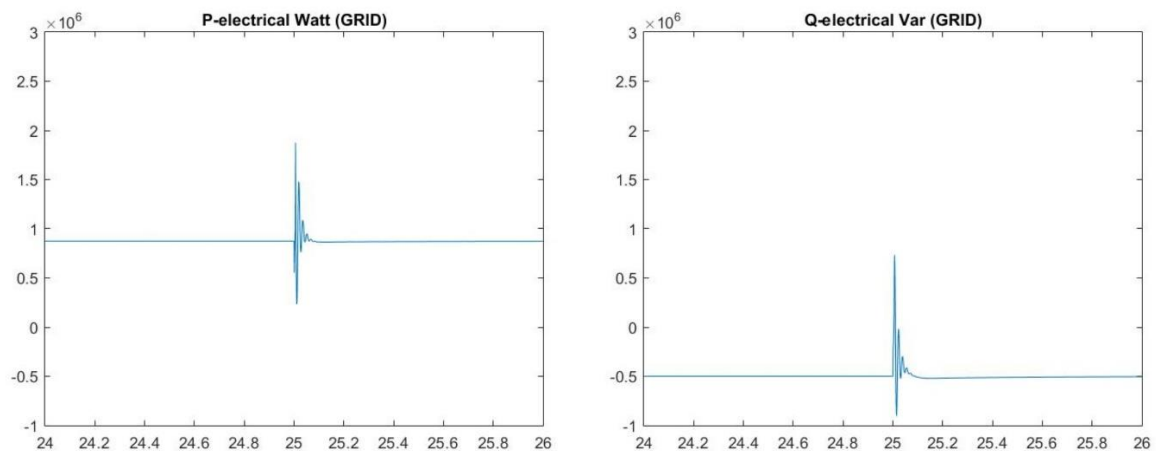
Εύκολη είναι η παρατήρηση πως η παραγωγή με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος παραπέμπει αρκετά στη χρήση συμβατικών μονάδων με σύγχρονες γεννήτριες. Η μονή πλεονεκτική διάφορα είναι η άμεση διάθεση ελέγχου τάσης και συχνότητας χάρη στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς. Όμως διασύνδεση μιας ανεμογεννήτριας σε άπειρο ζυγό αποτελεί απλά ένα συμβιβασμό. Στη πραγματικότητα το σύστημα εκτός από την απότομη μεταβολή των ριπών άνεμου θα πρέπει να έχει μεγάλη αντοχή σε μονοφασικά και πολυφασικά βραχυκυκλώματα αλλά και σε απότομες πτώσεις τάσης. Το αντικείμενο αυτό αποτελεί το θέμα του παρόντος εδαφίου.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα Θεωρούμε πως η τάση του δικτύου θα έχει πτώση από τα 690 V στα 300 για μικρό χρονικό διάστημα ενώ Θεωρούμε πως η μέση ταχύτητα του άνεμου είναι στα 10 m/s. Η πτώση τάσης είναι ακαριαία και λαμβάνει χώρα στο χρονικό διάστημα μεταξύ του 25<sup>ου</sup> δευτερόλεπτου της προσομοίωσης όπως φαίνεται και στην εικόνα 4. 19.



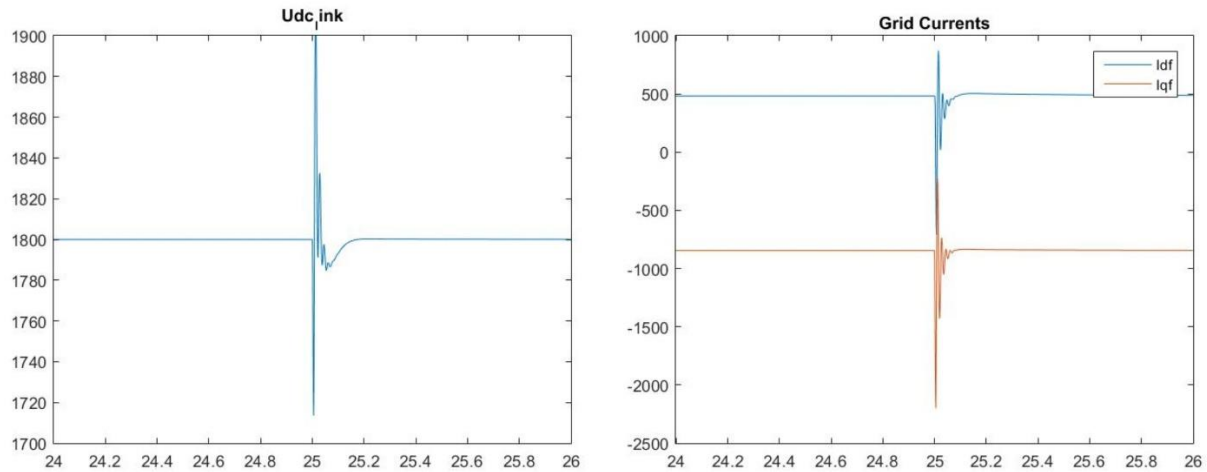
Εικόνα 4.20 Πτώση τάσης σε σύστημα ανεμογεννήτριας σε συνθήκες σταθερού ανέμου.

Όπως είναι φυσικό μια πτώση τάσης θα έχει άμεσο αντίκτυπο στο συνδεδεμένο σύστημα. Υπενθυμίζεται πως η μεταβολή λαμβάνει χώρα με βάση το προηγούμενο παράδειγμα όπου η άεργος ισχύς είχε ρυθμιστεί σε αρνητικές τιμές.



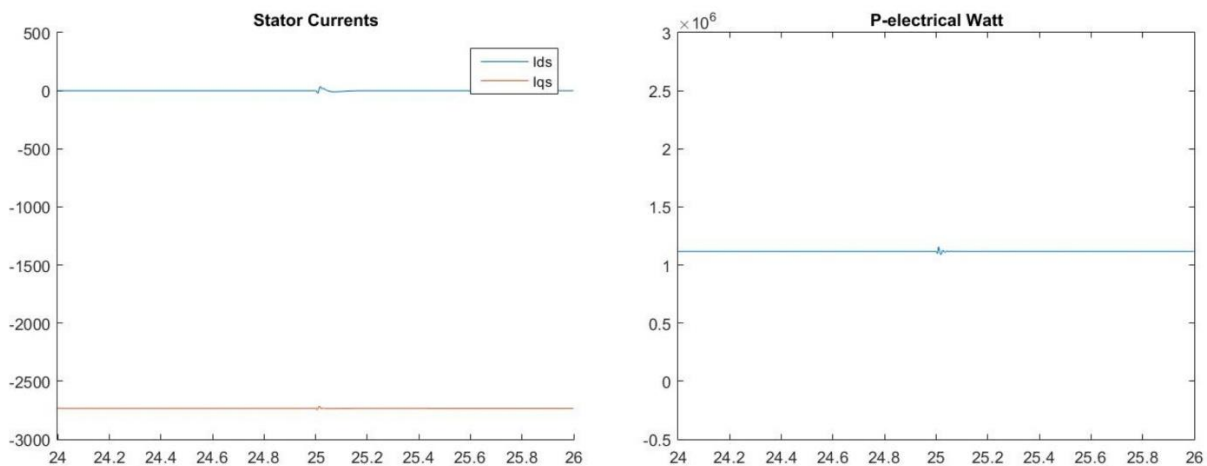
Εικόνα 4.21 Ενεργός και άεργος ισχύς που εισέρχεται στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της πτώσης τάσης.

Η ισχύς που δίνεται στο δίκτυο απορροφάται από τον πυκνωτή της DC διασύνδεσης. Όπως είναι φυσικό η αλληλεπίδραση έχει άμεσο αντίκτυπο.



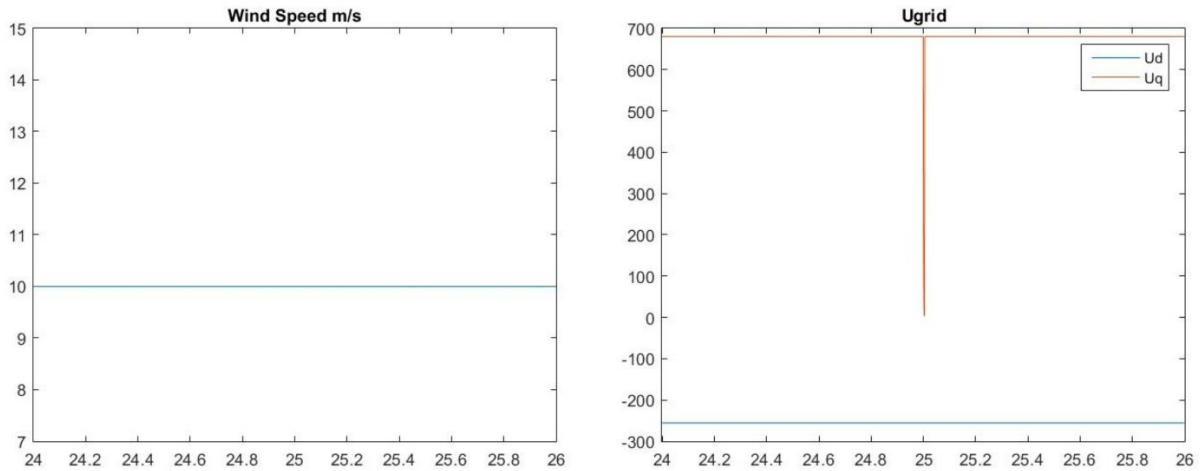
Εικόνα 4.22 Απόκριση DC διασύνδεσης και ρεύματα του μετατρεπτα στη πλευρά του δικτύου κατά τη διάρκεια της πτώσης τάσης.

Όμως χάρη στη DC διασύνδεση οι μεταβολές που προκαλεί η πτώση τάσης δεν έχουν άμεση αλληλεπίδραση στη πλευρά του μετατροπέα της γεννήτριας όπως και φαίνεται στην εικόνα 4.22.



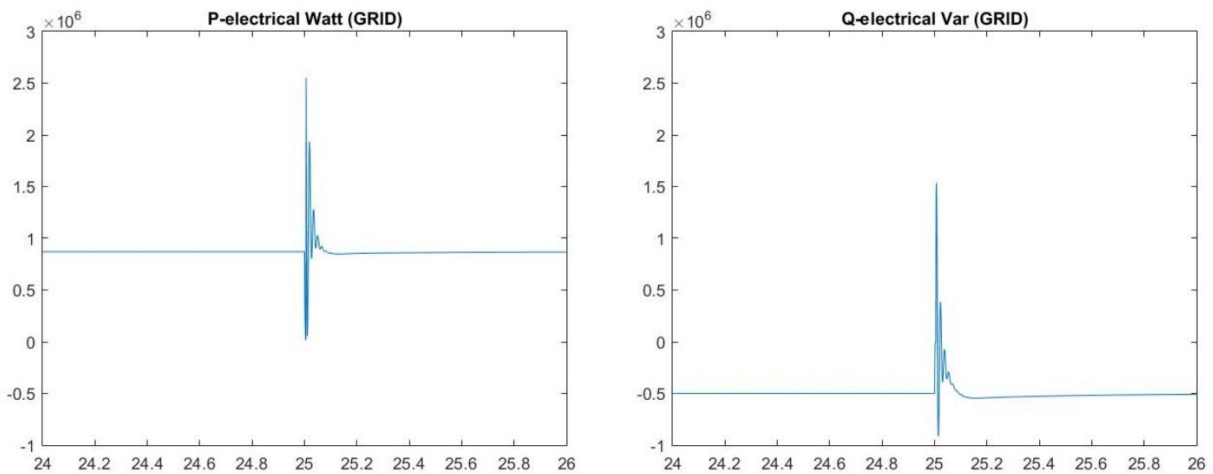
Εικόνα 4.23 Ρεύματα και ενεργός ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας το συστήματος.

Έκτος από πτώσεις τάσης, ένα σύστημα ανεμογεννήτριας πρέπει να έχει αντοχές και σε βραχυκυκλώματα μιας ή πολλών φάσεων. Παρακάτω θα παρουσιαστεί η ευστάθεια του αιολικού συστήματος απέναντι σε βραχυκύκλωμα σε μια από τις τρεις φάσεις στη πλευρά του δικτύου. Η ταχύτητα του άνεμου θεωρείται πως κυμαίνεται γύρω από μια σταθερή τιμή ίση με 10 m/s ενώ σε ένα μικρό χρονικό φάσμα γύρω από τη περιοχή των 25 δευτερόλεπτων η μια εκ των τριών φάσεων του δικτύου βραχυκυκλώνεται.



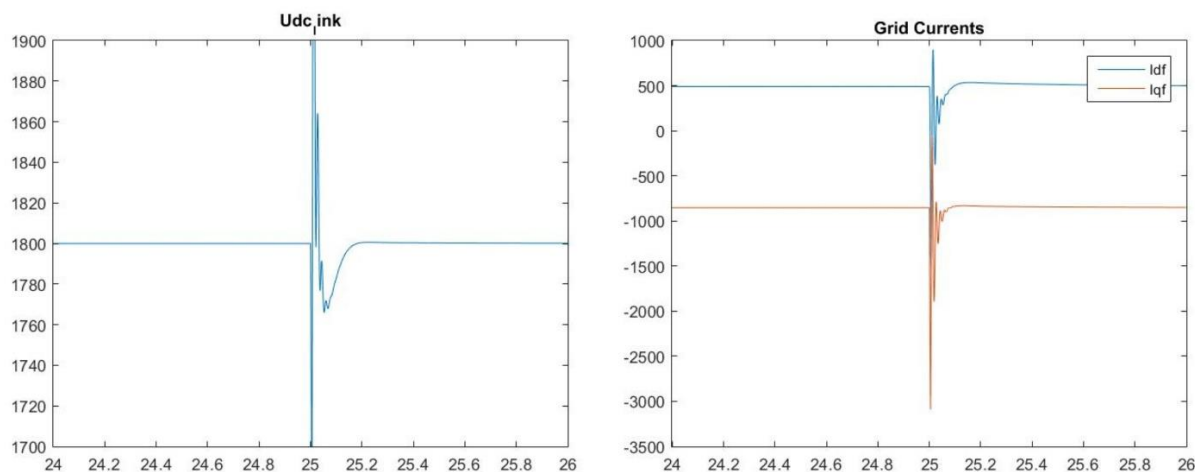
Εικόνα 4.24 Ταχύτητα ανέμου και τάση δικτύου κατά τη διάρκεια μονοφασικού βραχυκυκλώματος

Όπως είναι αναμενόμενο το βραχυκύκλωμα έχει άμεσο αντίκτυπο στην προσδιδόμενη ενεργό και άεργο ισχύ. Να σημειωθεί πως ακολουθείται το ίδιο παράδειγμα όπου η άεργος ισχύς έχει ρυθμιστεί σε αρνητικές τιμές δηλαδή το σύστημα απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο.



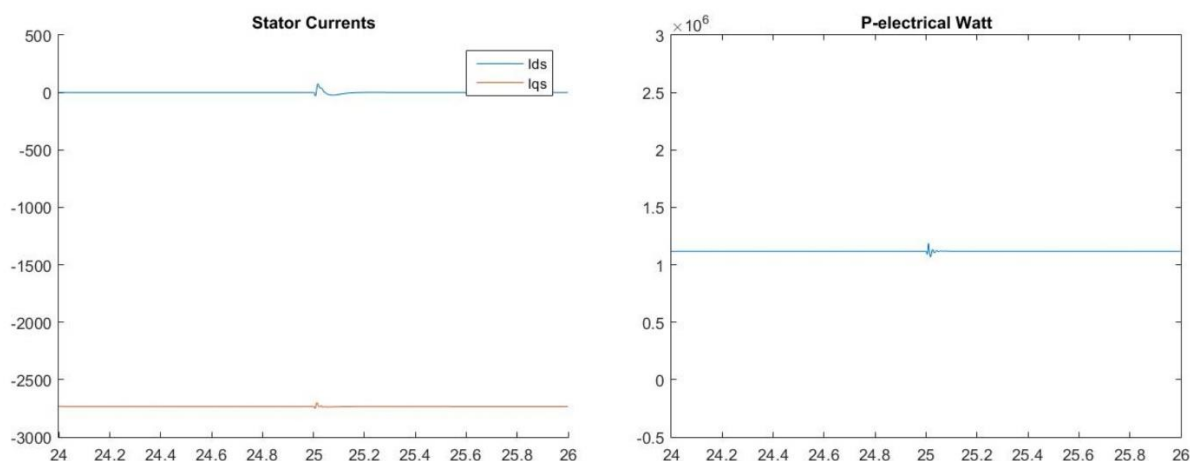
Εικόνα 4.25 Ενεργός και Άεργος Ισχύς που προσδίδεται στο δίκτυο.

Ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου τροφοδοτείται από τη DC διασύνδεση η οποία έρχεται σε αστάθεια. Η αστάθεια όμως βρίσκεται εντός λογικών πλαισίων. Ως εκ τούτου προκύπτουν και οι διακυμάνσεις στα ρεύματα του μετατροπέα.



Εικόνα 4.26 Τάση στη DC διασύνδεση και ρεύματα του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου.

Χάρη στη DC διασύνδεση όμως η απότομη βραχυκύκλωση στην άκρη του συστήματος δε μεταφέρεται στη πλευρά της μηχανής και ο μετατροπέας στη θέση αυτή δεν έχει μεγάλες αυξομειώσεις όπως και φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.27 Ρεύματα στάτη σύγχρονης γεννήτριας και Ενεργός Ισχύς που αυτή αποδίδει.

Συμφωνά με όσα ειπωθήκαν στο κεφάλαιο αυτό είναι εύκολο να συμπεραίνει κανείς πως τα αιολικά συστήματα έχουν μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης. Χάρη στην ανάπτυξη της τεχνολογίας συστημάτων και ηλεκτρονικών μετατροπών η παραγωγή τους τείνει να είναι όλο ένα και πιο σταθερή ακόμα και σε ακραία φαινόμενα. Με τη χρήση αιολικών συστημάτων είναι ευκολότερη η ρύθμιση της άεργου ισχύος ενώ η ευστάθεια τους κρίνεται πολύ στιβαρή.

## 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων που απαιτούνται για τη τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια. Τα στάδια του δικτύου μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις ομάδες οι οποίες είναι[10]–[12]:

- Η Παραγωγή.
- Η Μεταφορά.
- Η Διανομή
- Η Κατανάλωση.

Κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν σημαντικές παράμετροι οι οποίες πρέπει να είναι γνώστες για λόγους ευστάθειας και ασφάλειας. Στη μελέτη των παραμέτρων,

- Πρέπει να είναι γνωστά τα μεγέθη των τάσεων κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς και,
- Να είναι γνώστες οι ροές ενεργού και άεργου ισχύος σε όλες τις γραμμές ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας[10].

Ο υπολογισμός των παραπάνω γίνεται για δεδομένο σημείο λειτουργίας το οποίο έχει άμεση εξάρτηση από τις τάσεις, τη παραγωγή και την κατανάλωση στα διάφορα σημεία του δικτύου. Η ανάλυση αυτή ορίζεται ως μελέτη ροών φορτίου και αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη αυτή δίνει την ικανότητα για[10]:

- Τη διατήρηση των ροών και των τάσεων σε προκαθορισμένα ασφαλή επίπεδα (θερμικά όρια γραμμών).
- Τη βέλτιστη οικονομική διαχείριση και τον υπολογισμό των ελαχιστων απωλειών
- Τη μελέτη για περεταίρω ανάπτυξη του συστήματος
- Τη προσομοίωση επιπτώσεων από ενδεχόμενες διαταραχές με σκοπό τη πρόληψη[10].

Συνεπώς η μελέτη ροών φορτίου αποτελεί σημαντικότερο παράγοντα για τη κατασκευή ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας όντας και το πιο συνηθισμένο εργαλείο στην ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

## 5.2 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Υπάρχουν διάφορα στοιχεία υποδομών τα οποία υποστηρίζουν τη μεταφορά ηλεκτρισμού στους καταναλωτές. Τα στοιχεία ενός συστήματος είναι

- Οι μονάδες παραγωγής οι οποίες αναφέρονται ως γεννήτριες.
- Οι Γραμμές μεταφοράς.
- Οι Μετασχηματιστές

- Οι εγκάρσιοι πυκνωτές και πηνία.
- Τα φορτία.

Όταν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται η τάση της αυξάνεται σε έναν υποσταθμό. Με τον τρόπο αυτό η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις με τις ελάχιστες απώλειες. Η μεταφορά γίνεται με εναέριες ή υπόγειες γραμμές μεταφοράς. Πριν φτάσει στο προορισμό της, η ηλεκτρική ενέργεια εισάγεται πάλι σε έναν υποσταθμό για την επιπλέον μετατροπή της σε επίπεδα όπου είναι εφικτή η μεταφορά της από γραμμές διανομής (χαμηλής τάσης). Από τη διαδικασία αυτή τελικός προορισμός είναι ο καταναλωτής [10], [11].

Το ηλεκτρικό δίκτυο παρέχει ενέργεια σε διάφορους καταναλωτές με διαφορετικές ανάγκες. Παραδείγματος χάρη, οι βιομηχανικοί καταναλωτές αποτελούν μεγάλα εργοστάσια με πολύ μεγάλες ανάγκες ηλεκτρισμού, οι εμπορικοί καταναλωτές είναι κτίρια με ελαφρώς αυξημένες απαιτήσεις όπως μεγάλα κτίσματα ή ουρανοξύστες. Τέλος οι οικιακοί καταναλωτές αποτελούν κατοικίες οι στις οποίες η κατανάλωση δεν έχει μεγάλες απαιτήσεις ισχύος [10].

Η κεντροποιημένη κατασκευή του δικτύου το καθιστά ιδανικό για παραγωγή ηλεκτρισμού σε μεγάλη κλίμακα ωστόσο κάποιες υποδομές αρχίζουν να θεωρούνται απαρχαιωμένες βρίσκοντας αδυναμία προσαρμογής σε νέες τεχνολογίες παραγωγής. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι τα Smart-Grid. Αυτό αποτελεί ένα δίκτυο το οποίο ρυθμίζεται στατιστικά με τη χρήση υπολογιστών καθιστώντας τη παραγωγή ακόμα πιο αποδοτική όμως η ανάλυση αυτού ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας [10], [11].

---

#### 5.2.1 ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Ο πιο κοινός τρόπος παράστασης των μονάδων παραγωγής είναι η ανάδειξη τους σαν πηγες ενεργού και άεργου ισχύος. Θεωρείται δηλαδή ότι μια μονάδα παραγωγής είναι μια γεννήτρια η οποία παρέχει ενεργό και άεργο ισχύς ως εξής:

$$S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi} \quad (5.1)$$

Όπου  $S_{Gi}$  είναι η παραγόμενη ισχύς,  $P_{Gi}$  η παραγόμενη ενεργος ισχύς και  $Q_{Gi}$  η παραγόμενη άεργος ισχύς. Υπενθυμίζεται όμως ότι οι σύγχρονες γεννήτριες διαθέτουν συστήματα αυτόματης ρύθμισης τάσης και ισχύος. Αυτά είναι ο ρυθμιστής τάσης (Exciter) και ο ρυθμιστής στροφών (Governor) στα οποία έγινε αναφορά στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Συνεπώς κατά τη μελέτη ροών ισχύος οι σύγχρονες γεννήτριες παριστάνονται Συνήθως με σταθερή τερματική τάση και σταθερή παραγωγή ισχύος [10]β.



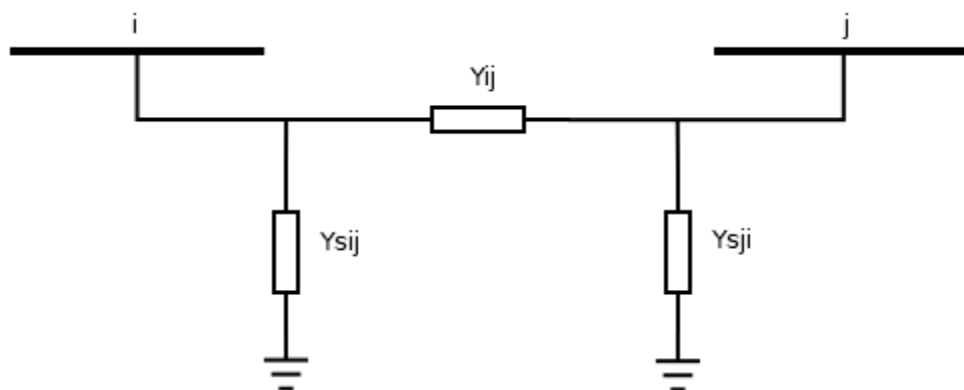
### 5.2.2 ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Έχοντας καλύψει το στάδιο της παραγωγής σε προηγούμενα κεφάλαια έπεται να εξηγηθεί και το στάδιο της μεταφοράς. Κατά τη μεταφορά όσο και διανομή, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με τη χρήση αγωγών. Πρακτικά μια γραμμή μεταφοράς αποτελείται από καλώδια μεγάλου μήκους κατασκευασμένα κυρίως από αλουμίνιο στο οποίο Χρησιμοποιείται η τεχνική συνεστραμμένων κλώνων. Με τη τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται επιμέρους κλώνοι από καλώδιο αλουμινίου οι οποίοι τυλίγονται γύρω από καλώδιο αποτελούμενο από χάλυβα. Έτσι η γραμμή μεταφοράς απόκτα πλεονεκτήματα όσον αφορά την ευκαμψία και τη μηχανική αντοχή προσδίδοντας την επιλογή της μη χρήσης χαλκού ενώ παράλληλα μειώνονται και οι απώλειες λόγω του επιφανειακού φαινομένου[10]–[12].

Κατά τη μελέτη ροών φορτίου, μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να παρασταθεί με ένα μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα με τέσσερις κατανεμημένες παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί της γραμμής μεταφοράς είναι:

- Η αυτεπαγωγή  $L$  (σε  $H/m$ ) της γραμμής ανα φαση και ανά μονάδα μήκους του αγωγού.
- Η ωμική αντιστάση  $r$  (σε  $\Omega/m$ ) της γραμμής ανα φαση και ανά μονάδα μήκους του αγωγού.
- Η εγκάρσια χωρητικότητα  $C$  (σε  $F/m$ ) της γραμμής ανα φαση και ανά μονάδα μήκους του αγωγού[10].

Δηλαδή η ανάλυση παραπέμπει στο ονομαστικό  $\Pi$  ισοδύναμο. Όμως υπάρχει η διαφορά ότι οι μεταβλητές υπολογίζονται σε μονάδες αγωγιμωτήτων. Συνεπώς μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να αναπαρασταθεί ως εξής[10]–[12]:



Εικόνα 5.1 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους.

Στην εικόνα 5.1 η σύνθετη αγωγιμότητα  $Y_{ij}$  είναι η σύνθετη αγωγιμότητα σειράς της γραμμής ενώ  $Y_{sij}$  και  $Y_{sj}$  είναι οι εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες. Με τον όρο σύνθετες τονίζεται ότι οι

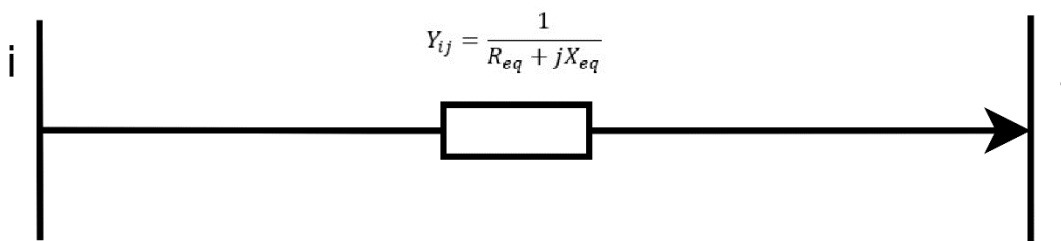
μεταβλητές αυτές αποτελούν μιγαδικούς αριθμούς. Μια μορφή γραφής των παραμέτρων είναι ο διαχωρισμός σε πραγματικά και φανταστικά μέρη ως εξής:

$$\begin{cases} Y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \\ Y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \\ Y_{sji} = g_{sji} + jb_{sji} \end{cases} \quad (5.2)$$

Να σημειωθεί ότι στη παρούσα εργασία θα θεωρηθεί ότι στις τριφασικές γραμμές μεταφοράς οι παράμετροι έχουν ίσες τιμές για κάθε φάση του τριφασικού συστήματος.

### 5.2.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

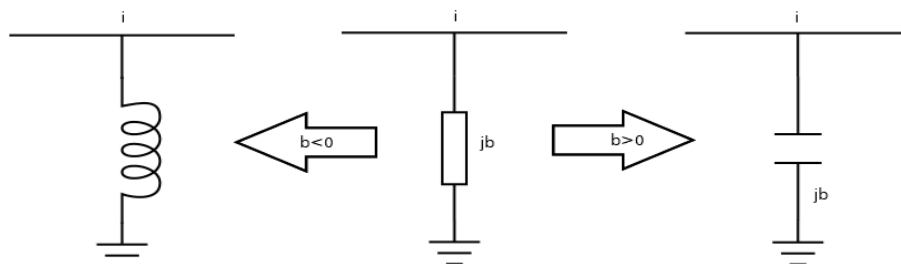
Οι μετασχηματιστές αποτελούν κυκλωματικές διατάξεις πηνίων οι οποίες βρίσκουν χρήση στον έλεγχο του επίπεδου των τάσεων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το λόγο των τυλιγμάτων των πηνίων που διαθέτουν. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αυτεπαγωγή των πηνίων λόγω μαγνητικών ροών από το ένα στο άλλο και συνεπώς μπορούν να αναπαρασταθούν ως ένα ισοδύναμο κύκλωμα με μια αντίσταση και μια αυτεπαγωγή. Δηλαδή ένας μετασχηματιστής παριστάνεται με ένα ισοδύναμο RL κύκλωμα ως εξής[10]:



Εικόνα 5.2 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή για μελέτη ροών φορτίου.

### 5.2.4 ΕΓΚΑΡΣΙΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΚΑΙ ΠΗΝΙΑ

Η χρήση εγκάρσιων πυκνωτών και πηνίων βασίζεται στην υποστήριξη της ρύθμισης της άεργου ισχύος αλλά και της τάσης σε υποσταθμούς του συστήματος μεταφοράς. Τα στοιχεία αυτά χάρη στις ιδιότητές τους μπορούν να εισάγουν άεργο ισχύ η οποία να αντισταθμίζει κάποια ανεπιθύμητη άεργο ισχύ. Κατά τη μελέτη ροών ισχύος η αναπαράσταση τους μπορεί να γίνει με βάση μια μιγαδική ποσότητα αγωγιμότητας ως  $y_i = jb_i$ . Η διασύνδεση τέτοιων στοιχείων γίνεται με βάση τη γη συνεπώς μια αναπαράσταση αυτών είναι η ακόλουθη[10]:



Εικόνα 5.3 Εγκάρσια στοιχεία.

Όταν η αγωγιμότητα  $b$  είναι θετική το στοιχείο έχει χωρητική συμπεριφορά (πυκνωτής) ενώ όταν το  $b$  είναι αρνητικό, το στοιχείο έχει επαγωγική συμπεριφορά (πηνίο). Στη πιο συχνή περίπτωση η άεργος ισχύς ενός δικτύου φέρει θετικές τιμές. Δηλαδή έχει επαγωγικό χαρακτήρα. Συνεπώς Χρησιμοποιείται πυκνωτής για την αντιστάθμιση της [10], [12].

### 5.2.5 ΦΟΡΤΙΑ

Στη μελέτη ροών ισχύος τα φορτία μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες.

- Τα φορτία σταθερής ενεργού και άεργου ισχύος
- Τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας.

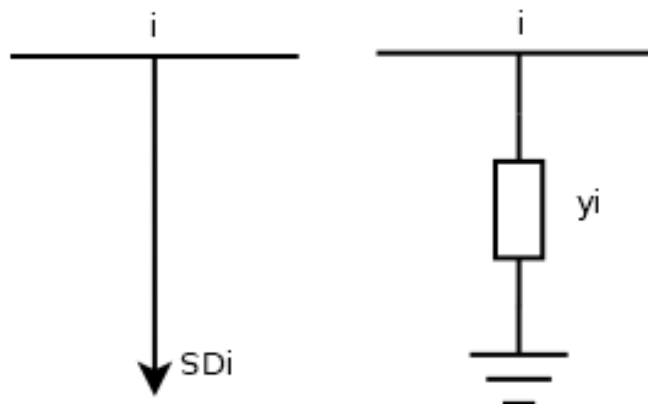
Η μιγαδική ισχύς του φορτίου σταθερής ισχύος είναι ίση με:

$$S_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di} \quad (5.3)$$

Ενώ ένα φορτίο σταθερής αγωγιμότητας μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$y_i = g_i + jb_i \quad (5.4)$$

Η αναπαράσταση των παραπάνω μπορεί να φανεί στην παρακάτω εικόνα.

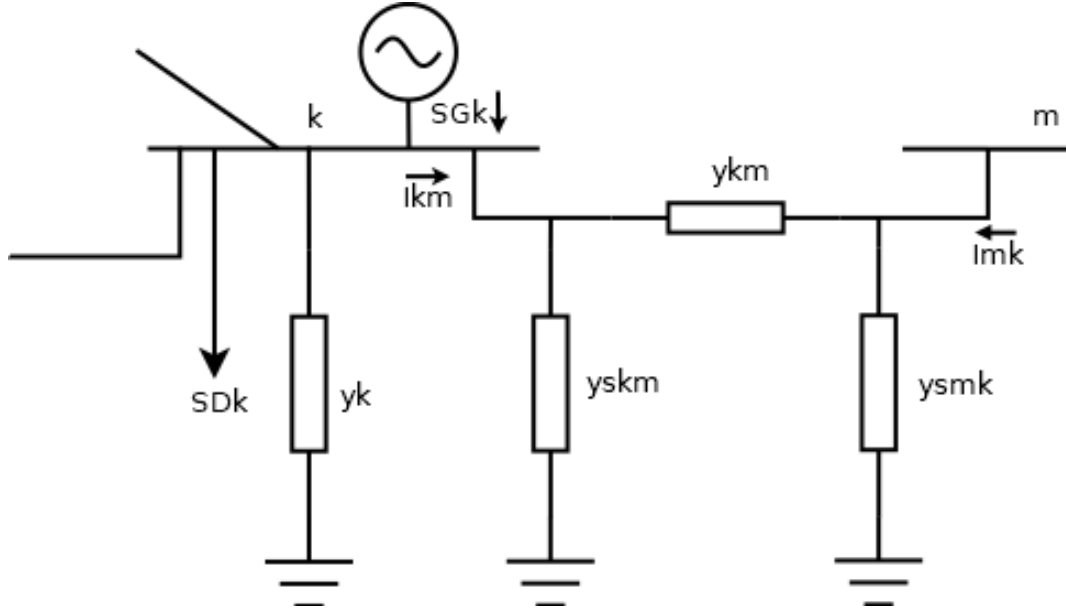


Εικόνα 5.4 Φορτίο σταθερής ισχύος (αριστερά) και φορτίο σταθερής αγωγιμότητας (δεξιά).

Παρατηρούμε πως τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας έχουν ίδια αναπαράσταση με τα εγκάρσια στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω [10].

## 5.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

Λαμβάνοντας υπόψιν τα επιμέρους στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ροών φορτίου είναι εφικτή η επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων από το οποίο θα προκύψουν και οι επιθυμητές τιμές των τάσεων, ισχύων και γωνιών. Η γενικευμένη μορφή ενός ζυγού μπορεί να αναπαρασταθεί στο παρακάτω σχήμα [10], [11].



Εικόνα 5.5 Γενικευμένη μορφή ζυγού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως παρατηρείται και στο παραπάνω σχήμα, η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών  $k$  και  $m$  παριστάνεται με βάση το  $\Pi$  ισοδύναμο. Επίσης στο ζυγό  $k$  είναι συνδεδεμένο ένα φορτίο σταθερής ισχύος, μια μονάδα παραγωγής (γεννήτρια), ένα φορτίο σταθερής αγωγιμότητας (ή εγκάρσιος πυκνότης-πηνιο) ενώ υπάρχουν και επιπλέον πιθανές διασυνδέσεις με γειτονικούς ζυγούς. Η γεννήτρια τροφοδοτεί ρεύμα  $\widehat{I}_{Gk}$  στο ζυγό ενώ το φορτίο  $\widehat{S}_{Dk}$  απόρροφα ρεύμα ίσο με  $\widehat{I}_{Dk}$ . Οι τάσεις στους ζυγούς  $k$  και  $m$  μπορούν να συμβολιστούν ως  $\widehat{V}_k$  και  $\widehat{V}_m$  αντίστοιχα. Τέλος, στη γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών  $k$  και  $m$  διαρρέεται ρεύμα ίσο με [10]:

$$\widehat{I}_{km} = (y_{skm} + y_{km})\widehat{V}_k - y_{km}\widehat{V}_m \quad (5.5)$$

Με απλές εφαρμογές του νόμου του Ohm και του νόμου του Kirchhoff, παρατηρούμε πως το ρεύμα της εγκάρσιας αγωγιμότητας  $y_k$  ισούται με  $y_k\widehat{V}_k$  καθώς επίσης πως

$$\widehat{I}_{Gk} - \widehat{I}_{Dk} = y_k\widehat{V}_k + \sum_{m \in A(k)} \widehat{I}_{km} \quad (5.6)$$

Όπου  $A(k)$  το σύνολο στο οποίο εμπεριέχονται οι δείκτες των ζυγών  $m$  που έχουν άμεση διασύνδεση με το ζυγο  $k$ . Δηλαδή:

$$A(k) = \{m: y_{km} \neq 0\} \quad (5.7)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (5.5) στην εξίσωση (5.6) παίρνουμε

$$\widehat{I}_{Gk} - \widehat{I}_{Dk} = [y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{km})]\widehat{V}_k - \sum_{m \in A(k)} (y_{km}\widehat{V}_m) \quad (5.8)$$

Στη συνέχεια θέτουμε

$$\begin{cases} Y_{kk} = y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{km}) \\ Y_{km} = -(y_{km} + y_{skm}) \end{cases} \quad (5.9)$$

Οπότε η εξίσωση (5.8) γίνεται

$$\widehat{I}_k = \widehat{I}_{Gk} - \widehat{I}_{Dk} = Y_{kk} \widehat{V}_k + \sum_{m \in A(k)} Y_{km} \widehat{V}_m = \sum_{m=1}^n Y_{km} \widehat{V}_m \quad (5.10)$$

Η εξίσωση 5.10 εκφράζει τις εξισώσεις των κόμβων ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ο συνδυασμός εξισώσεων 5.9 εκφράζει τα διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα αγωγιμοτήτων  $Y$  ο οποίος έχει διαστάσεις  $n \times n$ . Όπου  $n$  ο αριθμός των ζυγών του συστήματος. Στη περίπτωση που ένας ζυγός δεν έχει άμεση σύνδεση με έναν άλλο, τότε στον πίνακα αγωγιμοτήτων εισάγεται η τιμή 0 στις θέσεις  $km$  και  $mk$ [10].

Κατα τη μελέτη ροών ισχύος, οι μεταβλητές στις οποίες στρέφεται το ενδιαφέρον είναι οι μιγαδικές ισχύς παραγωγής  $S_{Gk}$  και φορτίου  $S_{Dk}$ . Σχεδόν σε κάθε περίπτωση αυτές αποτελούν είτε το ζητούμενο είτε το δεδομένο του προβλήματος[10].

Ισχύει ότι

$$\begin{cases} S_{Gk} = \widehat{V}_k \widehat{I}_{Gk}^* \\ S_{Dk} = \widehat{V}_k \widehat{I}_{Dk}^* \end{cases} \quad (5.11)$$

Οπότε με το συνδυασμό των σχέσεων παίρνουμε ότι

$$S_k = S_{Gk} - S_{Dk} = Y_{kk}^* \widehat{V}_k^2 + \widehat{V}_k \sum_{m \in A(k)} Y_{km}^* \widehat{V}_m^* \quad (5.12)$$

Όπου  $S_k$  η συνολική έγχυση ισχύος στον ζυγό  $k$ .

Η εξίσωση 5.12 ονομάζεται μιγαδική εξίσωση ροής φορτίου για το ζυγό  $k$  και εκφράζει το ισοζύγιο ισχύος στο ζυγό αυτό. Σε ένα σύστημα με  $n$  ζυγούς μπορούν να γράφουν αντίστοιχες εξισώσεις οι οποίες αποτελούν και τις μιγαδικές εξισώσεις ροής φορτίου[10].

#### 5.4 ΖΥΓΟΙ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Οι ζυγοί ροής φορτίου αποτελούν το σημείο όπου γίνεται η διασύνδεση των παραπάνω και ισχύουν οι νομοί ρευμάτων του Kirchhoff. Αυτοί ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες

1. Το ζυγό ταλάντωσης ή ζυγό αναφοράς. Στο ζυγό αυτό η έγχυση ενεργού και άεργου ισχύος αφήνονται ελεύθερες. Η τιμή της τάσης του ορίζεται να είναι ίση με  $V = 1 \text{ V pu}$ .
2. Το ζυγό φορτίου ή ζυγό PQ. Σαν ζυγός φορτίου ορίζεται ο κάθε ζυγός για τον οποίο είναι γνωστή η έγχυση ισχύος. Φυσικά για ενδιάμεσους ζυγούς όπου δεν υπάρχει άμεση σύνδεση γεννητριών και φορτίων, η έγχυση ισχύος έχει γνωστή τιμή ίση με 0. Συνεπώς οι ζυγοί αυτοί υπάγονται στους ζυγούς φορτίου.
3. Το ζυγό παραγωγής. Ζυγός παραγωγής θεωρείται ο ζυγός για τον οποίο είναι γνωστή η έγχυση ενεργού ισχύος και το μέτρο της τάσης του. Θεωρείται επίσης πως ο ζυγός αυτός μπορεί να έχει παραγωγή άεργου ισχύος[10]. Τέλος ονομάζουμε το ζυγό αυτό ως PV.

Η έγχυση ενεργού ισχύος για ζυγό  $k$  ορίζεται ως  $P_k = P_{Gk} - P_{Dk}$  ενώ αντίστοιχα για την άεργο ισχύ  $Q_k = Q_{Gk} - Q_{Dk}$ . Η το μέτρο της τάσης είναι  $V_k$  και η φασική γωνία τάσης  $\delta_k$ . Θεωρούμε πως στο ζυγό ταλάντωσης η τιμή της τάσης είναι πάντα σταθερή και ίση με 1V pu με γωνία  $0^\circ$  και στην αρίθμηση παίρνει τη τιμή του πρώτου ζυγού[10].

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η υλοποίηση του λογισμικού το οποίο επιλύει το πρόβλημα της ροής φορτίου σε ζυγούς σε real-time χρόνο. Στο λογισμικό αυτό, ο χρήστης έχει την επιλογή να τοποθετεί ανεμογεννήτριες, συμβατικές μονάδες, γραμμές μεταφοράς, φορτία, ηλεκτρικά στοιχεία και μετασχηματιστές με σκοπό τη διασύνδεση τους σε ένα πλήρες δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η σύνδεση σε ζυγό μπορεί να γίνει για κάθε πιθανό συνδυασμό όλων των παραπάνω διατηρώντας την πληρότητα των ιδιοτήτων που αυτά έχουν.

Η βάση του προγράμματος λοιπόν είναι να τοποθετούνται τα εξής στοιχεία:

- Συμβατικές Μονάδες: Ο χρήστης εισάγει τα στοιχεία μιας (ή πολλών) σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης και τη τάση λειτουργίας της.
- Ανεμογεννήτριες: Ο χρήστης εισάγει τα χαρακτηριστικά μιας σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών, τις διαστάσεις πτερυγίων και τη περιοχή λειτουργίας μαζί με τις ταχύτητες του άνεμου. Όσον αφορά το σύστημα ελέγχου η επιλογή των συντελεστών  $K_p$  και  $K_i$  των PI ελεγκτών μπορεί να γίνει ενδεικτικά με τις αρχικοποιημένες παραμέτρους που προϋπάρχουν.
- Γραμμές μεταφοράς: Η γραμμή μεταφοράς που υποστηρίζεται μπορεί να έχει τα χαρακτηριστικά γραμμής μεγάλου μήκους χωρίς να είναι απαιτούμενη η τοποθέτηση των εγκάρσιων χωρητικότητας.
- Μετασχηματιστές: Στη περίπτωση του μετασχηματιστή λαμβάνεται υπόψιν η βασική λειτουργία της αυξομείωσης της τάσης σε συνδυασμό με την αυτεπαγωγή που αυτός έχει. Δηλαδή με τη τοποθέτηση μετασχηματιστή, γίνεται αλλαγή της τάσης με βάση την αναλογία που θα δοθεί και μπορεί να γίνει επιπλέον υπολογισμός της αυτεπαγωγής της γραμμής στην οποία συνδέεται.
- Ζυγοί: Στο ζυγό γίνεται η σύνδεση όλων των παραπάνω. Ζυγός θεωρείται η διασύνδεση όπου ισχύει ο νόμος των ρευμάτων του Kirchhoff. Κατά τη τοποθέτηση των στοιχείων, ο χρήστης επιλέγει τη σύνδεση ζυγών με οποιοδήποτε συνδυασμό από τα παραπάνω στοιχεία και έπειτα γίνεται η επίλυση των ροών φορτίου[10].

### 6.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

Εύκολο είναι κανείς να παρατηρήσει ότι το πρόβλημα ροών φορτίου απαιτεί επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων με μιγαδικούς αριθμούς ή την επίλυση με πραγματικούς λύνοντας ως προς ενεργό και άεργο ισχύ ξεχωριστά. Προφανώς για ένα μεγάλο ηλεκτρικό δίκτυο η επίλυση αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία ακόμα και με τη χρήση υπολογιστών[10]βο.

Στη γενική περίπτωση για την επιλυση μιας εξίσωσης  $g(x)$  μπορούμε να θεωρήσουμε τη γενική μορφή

$$g(x) = 0 \quad (6.1)$$

Καθώς οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές, γίνεται χρήση επαναληπτικών αριθμητικών μεθόδων. Περιληπτικά η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

1. Θεωρούμε μια αρχική κατάσταση η οποία έχει γνωστά χαρακτηριστικά και ορίζουμε ένα πλαίσιο ανοχής των σφαλμάτων.
2. Κάνουμε αντικατάσταση και ελέγχουμε αν ικανοποιούνται οι συνθήκες της εξίσωσης.
3. Αν οι συνθήκες της εξίσωσης δεν ικανοποιούνται, τότε γίνεται εκ νέου μια προσέγγιση της επόμενης τιμής για την οποία δοκιμάζεται αν ικανοποιούνται οι συνθήκες.
4. Γίνεται επανάληψη των βημάτων 2 και 3 έως ότου οι τιμές τις αντικατάστασης ικανοποιούν την εξίσωση μέσα στα πλαίσια της ανοχής[10].

Μια γνωστή μέθοδος επανάληψης είναι η Gauss και η παραλλαγή της Gauss-Seidel. Η μέθοδος Gauss προβλέπει την επαναληπτική μέθοδο που περιγράφεται παραπάνω. Με μια ανακατάταξη της εξίσωσης 5. 12 μπορεί εύκολα να προκύψει ότι

$$\widehat{V}_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left\{ \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{m \in A(k)} Y_{km} \widehat{V}_m \right\} \quad (6.2)$$

Σε μια επαναληπτική διαδικασία με μετρητή το συντελεστή  $i$ , Θεωρούμε ότι η  $i$ -οστη θέση της διαδικασίας είναι η εξίσωση 6. 2 ενώ η στη θέση  $i+1$  βρίσκεται η

$$\widehat{V}_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left\{ \frac{P_k - jQ_k^i}{[\widehat{V}_k^{(i)}]^*} - \sum_{m \in A(k)} Y_{km} \widehat{V}_m^{(i)} \right\} \quad (6.3)$$

Ο γνωστός όρος είναι αυτός της  $V_1$  καθώς στη θέση αυτή είναι δεδομένη η τοποθέτηση του ζυγού ταλάντωσης. Επίσης όσον αφορά τους ζυγούς φορτίου, η έγχυση άεργου ισχύος έχει σταθερή και γνωστή τιμή ενώ στους ζυγούς παραγωγής αυτή έχει μεταβολές σε κάθε ανακύκλωση του μετρητή  $i$  με τον υπολογισμό της από το φανταστικό μέρος της εξίσωσης. Επίσης στους ζυγούς παραγωγής λόγω των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου της τάσης, Θεωρούμε ότι η τάση έχει δεδομένη τιμή ενώ κρατάμε μόνο τη γωνία της  $\delta_k$  [10].

Μια εξέλιξη της παραπάνω μεθόδου είναι η μέθοδος Gauss-Seidel. Κατά το χρόνο της επανάληψης της προηγούμενης μεθόδου, το πρόγραμμα περίμενε να τελειώσει πλήρως τον κύκλο. Με τη χρήση της Gauss-Seidel η διάφορα είναι ότι Χρησιμοποιείται το υπολογισμένο μέρος των εξισώσεων και τοποθετείται για την επόμενη εξίσωση στη σειρά. Αυτό βελτιστοποιεί σημαντικά το χρόνο υπολογισμών καθώς η εκτίμηση της τελικής τιμής υπολογίζεται πολύ πιο γρήγορα[10].



Το λογισμικό ξεκινάει με την ανάθεση των μεταβλητών του δικτύου. Ο χρήστης πρέπει να τοποθετήσει τα πλήρη χαρακτηριστικά όλων των στοιχείων που πρόκειται να συμπεριληφθούν. Στη συνέχεια ορίζεται ο αριθμός των ζυγών καθώς και τα στοιχεία που θα φέρει ο καθένας από αυτούς. Η δήλωση ενός στοιχείου ζυγού γίνεται με τη χρήση της συνάρτησης BUS(S\_prod,S\_load , Y\_load , Voltage, connections , ykm\_list, yskm\_list).

Όπου

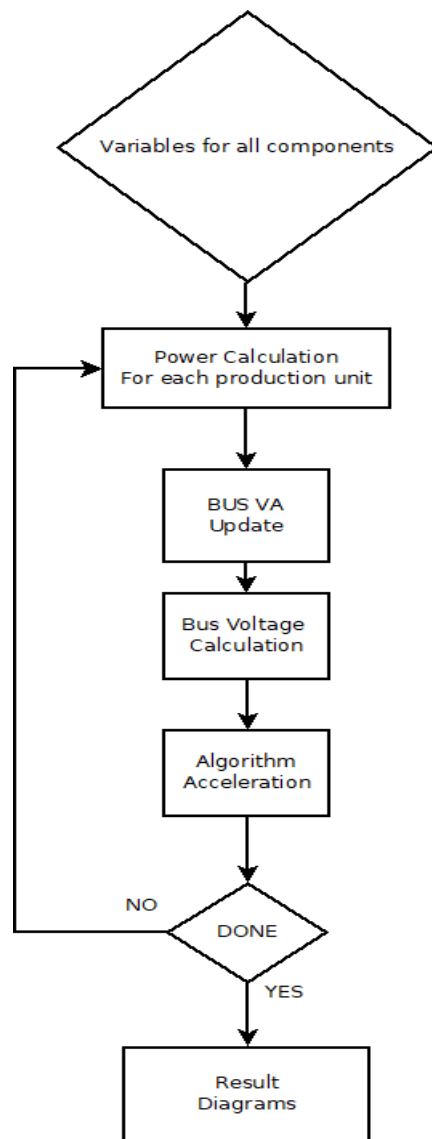
- S\_prod η ισχύς παραγωγής των γεννητριών στον ζυγό.
- S\_load η ισχύς των φορτίων στο ζυγό.
- Voltage η τάση του ζυγού.
- Connections ο πίνακας διασυνδέσεων με τους άλλους ζυγούς.
- ykm\_list η αντίσταση και επαγωγή των γραμμών μεταφοράς.
- yskm\_list η χωρητικότητα των γραμμών μεταφοράς.

Η διασύνδεση των ζυγών γίνεται με βάση τη μεταβλητή Connections. Αυτή αποτελεί έναν πίνακα διασυνδέσεων σε μορφή γραφου. Δηλαδή αν θεωρήσουμε ένα δίκτυο με τρεις ζυγούς, όπου ο ζυγός 1 συνδέεται μόνο με τον 2, η μεταβλητή Connections για το ζυγό 1 θα έχει τη τιμή [0 2 0]. Δηλαδή ο ζυγός 1 συνδέεται με τον 2 και η θέση του πίνακα Connections είναι η δεύτερη. Η μορφή αυτή προσφέρει μεγάλη ευκολία στη χειροκίνητη αποσφαλμάτωση σε περίπτωση λάθους κατά τη τοποθέτηση των στοιχείων σε ζυγούς.

Η συνάρτηση BUS έχει ως επιστροφή τα δεδομένα εισόδου της με τη προσθήκη όμως της κατάταξης του τύπου του κάθε ζυγού. Δηλαδή με τη συνάρτηση αυτή διευκρινίζεται αυτόματα αν ο ζυγός είναι ζυγός ταλάντωσης, φορτίου ή PQ.

Όσον αφορά τις γεννήτριες και τα φορτία, οι εξισώσεις επίλυσης τους τρέχουν μέσα σε δομές επανάληψης ταυτόχρονα για να υπάρχει η μεταξύ τους αλληλεπίδραση μέσα στο δίκτυο. Η ισχύς που παράγεται ή καταναλώνεται στον κάθε ζυγό τοποθετείται επαναληπτικά στη συνάρτηση BUS και στη συνέχεια όλες οι δομές των ζυγών εισέρχονται στη συνάρτηση υπολογισμού των τάσεων με όνομα CalculateVoltages. Αυτή υπολογίζει εσωτερικά τις τάσεις και τις γωνίες όλων των ζυγών για κάθε χρονική στιγμή με τη μέθοδο Gauss-Seidel που περιγράφηκε παραπάνω. Καθώς η επίλυση είναι στο σύστημα ανά μονάδα, η ανοχή έχει ελάχιστο όριο τη τιμή  $10^{-3}$ . Μικρότερες τιμές ανοχής θα χρειαστούν μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης.

Μια αναπαράσταση της ροής του λογισμικού μπορεί να φανεί στο διαγραμμα της παρακάτω παρακάτω εικόνας.



Εικόνα 6.1 Ροή λογισμικού ροών ισχύος

Με τη χρήση της μεθόδου αυτής η εκτέλεση των εξισώσεων της ροής ισχύος γίνεται παρά μόνο όταν υπάρχουν αλλαγές. Σε περίπτωση σταθερής κατάστασης οι επόμενες τιμές των υπολογισμών είναι ίδιες με τις προηγούμενες και συνεπώς η συνάρτηση υπολογισμού τάσεων αυτόματα δεν εκτελείται. Η εκτέλεση τη γίνεται παρά μόνο σε περιπτώσεις μεταβολής οποιουδήποτε στοιχείου για κάθε χρονική στιγμή. Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς σε περίπτωση αναταράξεων.

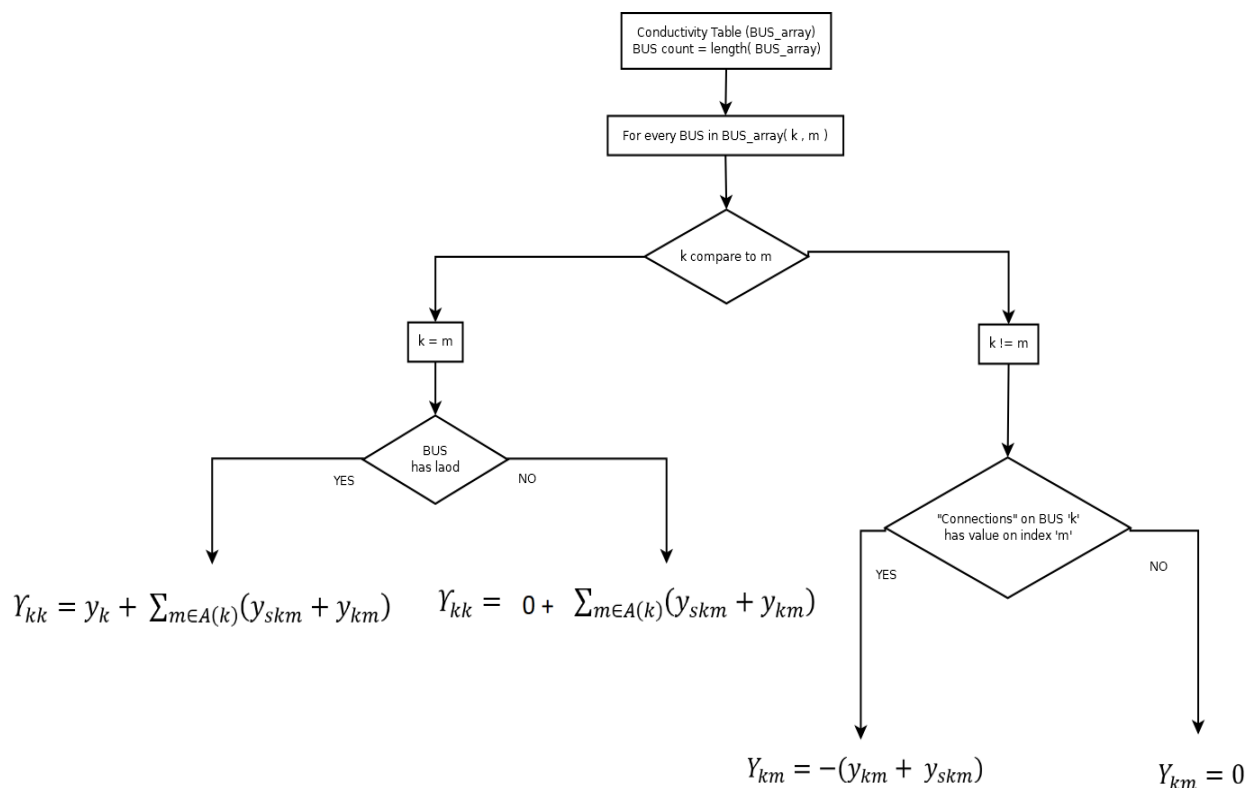
Λόγω του μεγάλου όγκου των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε μια επιτάχυνση στον αλγόριθμο Gauss\_Seidel. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η μέθοδος υπολογίζει επαναληπτικά μαντεύοντας την κατάλληλη τιμή. Η επιταχυνστή είναι εφικτή κατά τον υπολογισμό της διαφοράς του σφάλματος κατά τη σύγκριση των υπολογισμών με την προηγούμενη τιμή των μεταβλητών. Ο

αλγόριθμος θεωρεί πως το σφάλμα σε κάθε επανάληψη έχει απόκλιση κατά 40% ή 60% και επανυπολογίζει έτσι την αρχική τιμή. Με την τεχνική αυτή είναι εφικτή η ανάλυση της ροής φορτίου σε πραγματικό χρόνο αυξάνοντας σε ορισμένες περιπτώσεις τη ταχύτητα εκτέλεσης κατά 40%.

Με μια πιο αναλυτική ματιά, η ροή του λογισμικού μπορεί να αναλυθεί σε κάθε στάδιο τις εικόνες 6.1. Επειτα από την τοποθέτηση των χαρακτηριστικών της κάθε μονάδας, η πρώτη λειτουργία του λογισμικού αφορά την αρχικοποίηση των μεταβλητών για κάθε μονάδα ξεχωριστά. Αν κάποια μονάδα υπάρχει σε πολλαπλά σημεία στο ηλεκτρικό δίκτυο και έχει τα ίδια λειτουργικά χαρακτηριστικά (ίδια τάση λειτουργίας και παραγωγή), τότε αυτή αρχικοποιείται μόνο μια φορά. Λόγω της επιλυσής διαφορικών εξισώσεων και της μεταβλητότητας που αυτές παρουσιάζουν στα διαγράμματα κατά τη διαδικασία της αρχικοποίησης, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η τελική τιμή των εξισώσεων. Δηλαδή η λήψη των αρχικοποιημένων τιμών γίνεται μετά από μια μικρή εκτέλεση του λογισμικού όπου λαμβάνονται οι κανονικοποιημένες τιμές των μεταβλητών του κάθε συστήματος.

Η επέκταση στις αρχικές τιμές γίνεται στην καταχώρηση των ζυγών του συστήματος. Σε πρώτο πλάνο οι ζυγοί αρχικοποιούνται στη τιμή 1 V p.u με γωνία  $0^\circ$  και τοποθετούνται τα είδη φορτίων τα οποία έχουν πιθανή άμεση σύνδεση με το κάθε ζυγό ξεχωριστά. Στο σημείο αυτό ορίζεται και η δισυνδεση των ζυγών αναμεταξύ τους με τη μορφή του πίνακα Connections που αναφέρεται και πιο πάνω. Σε αυτό το στάδιο του λογισμικού ο χρήστης τοποθετεί τις μεταβλητές  $y_{km_{list}}$  και  $y_{skm_{list}}$ .

Έχοντας αρχικοποιήσει τους ζυγούς και τους πίνακες δισυνδεσης που πρακτικά αποτελούν τις γραμμές μεταφοράς, το επόμενο στάδιο αφορά τη δημιουργία του πίνακα αγωγιμωτήτων. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως ο πίνακας αγωγιμωτήτων είναι ένας τετραγωνικός πίνακας  $n \times n$  διαστάσεων ο οποίος δίνει τη τελική αγωγιμότητα που φαίνεται σε κάθε ζυγό του συστήματος. Η επεξήγηση της κατασκευής του πίνακα αγωγιμωτήτων μπορεί να παρουσιαστεί πολύ ποιοτικά στη παρακάτω εικόνα σε μορφή διαγράμματος ροής.



Εικόνα 6.2. Διάγραμμα ροής του κώδικα για τη κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων.

Θεωρούμε σύστημα  $n$  ζυγών και τις μεταβλητές προσπέλασης  $k$  και  $m$ . Με επαναληπτική διαδικασία ελέγχεται η διασύνδεση των ζυγών με βάση την αρίθμηση τους κατασκευάζοντας έτσι τον τετραγωνικό πίνακα  $Y_{n \times n}$ . Στην παραπάνω ανάλυση υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις τοποθέτησης στοιχείου. Όταν η προσπέλαση ενός ζυγού αφορά τη θέση του ίδιου ( $k = m$ ), ελέγχεται αν υπάρχει φορτίο και υπολογίζεται η συνολική αγωγιμότητα. Σε περίπτωση που μιλάμε για διαφορετικό ζυγό ( $k \neq m$ ) η τοποθέτηση του στοιχείου γίνεται με βάση τον πίνακα Connections που φέρει η κάθε δομή ζυγού. Στη περίπτωση που οι ζυγοί συνδέονται τοποθετείται η αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς. Αν η τιμή της μεταβλητής Connections του ζυγού  $k$  στη θέση  $m$  έχει μηδενική τιμή, σημαίνει πως οι ζυγοί δεν έχουν άμεση σύνδεση και συνεπώς τοποθετείται η τιμή 0.

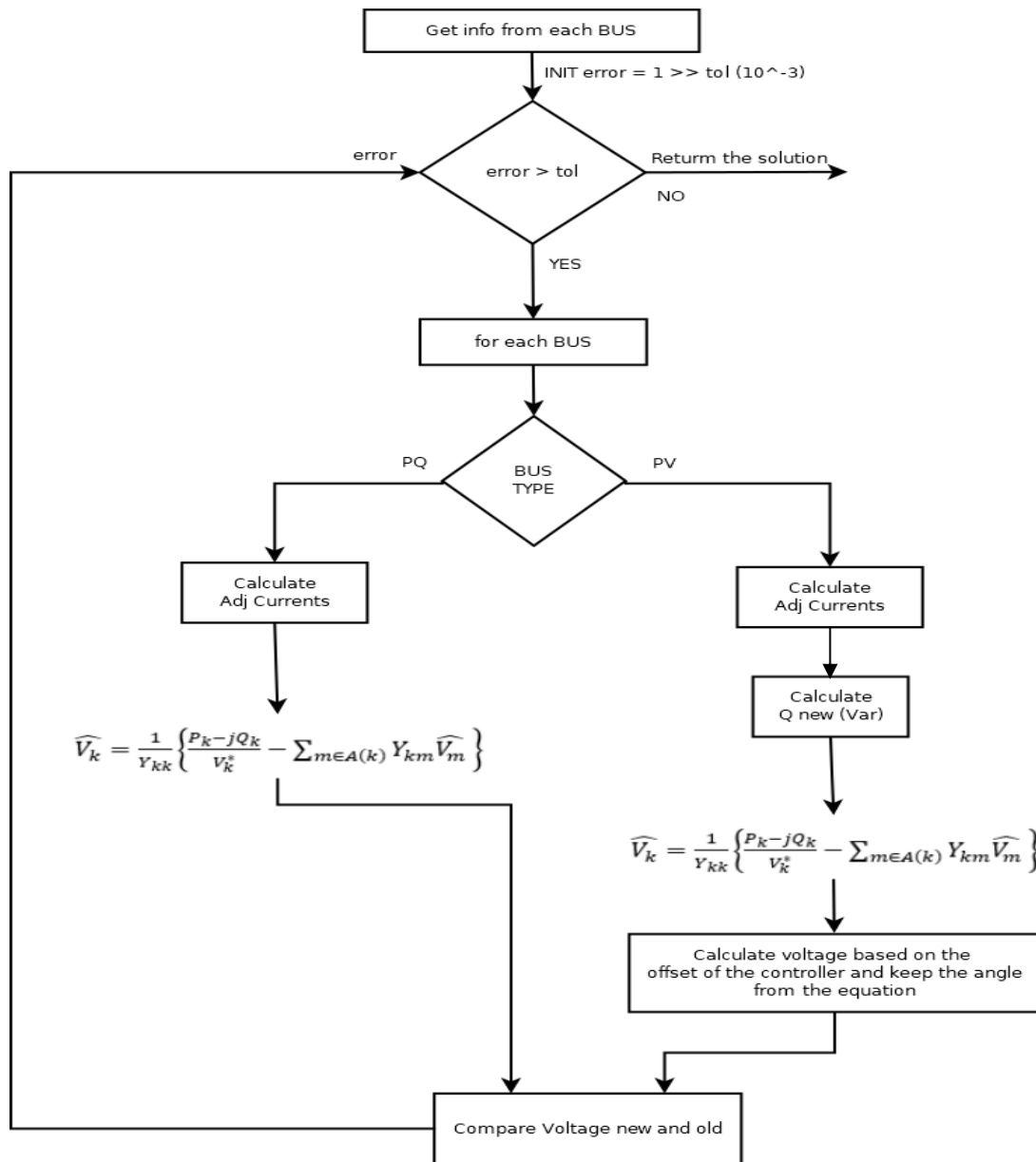
Σημαντική είναι η παρατήρηση πως δεν έχει οριστεί ακόμα ο ζυγός ταλαντώσης ή αλλιώς ζυγός αναφοράς. Στο εσωτερικό της δομής των ζυγών υπάρχει μια επιπλέον μεταβλητή η οποία ονομάζεται BUS\_type. Η μεταβλητή αυτή ορίζει τον τύπο του ζυγού με βάση το χαρακτηρισμό που έγινε και στην ενότητα 5.4. Αναφορικά ο τύπος ορίζεται ως BUS.type = 'slack'. Με το χαρακτηρισμό αυτό το πρόγραμμα επιλύει τις εξισώσεις αρχικοποιώντας το ζυγό με τη τιμή τάσης 1V pu με γωνία  $0^\circ$ . Ο χαρακτηρισμός των υπόλοιπων ζυγών γίνεται αυτόματα όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Υπάρχουν δυο επιπλέον τύποι ζυγών. Οι ζυγοί PQ και οι ζυγοί PV. Στους ζυγούς φορτίου (PQ) η ισχύς σε Watt και Var είναι προκαθορισμένη όμως η τάση είναι άγνωστη. Αντίστοιχα στους

ζυγούς PV η παραγωγή ενεργού ισχύος και η τάση είναι προκαθορισμένα και ελεγχόμενα μεγέθη όμως είναι άγνωστη η άεργος παραγωγή. Ο τρόπος υπολογισμού και των δυο τύπων ζυγών είναι με τη μέθοδο Gauss-Seidel βασιζόμενος στην εξίσωση 6. 2 και μπορεί να αναλυθεί σε βήματα όπως γίνεται παρακάτω. Διαχωρισμός επίλυσης για κάθε τυπο ζυγου (PQ ή PV)

1. Στη περίπτωση ζυγού PQ υπολογίζεται πρώτα το συνολικό ρεύμα του ζυγού συμφωνά με τα στοιχεία των γειτονικών ζυγών. Έτσι με απλή εφαρμογή της εξίσωσης 6. 2 είναι εφικτός ο υπολογισμός της τάσης του παρόντος ζυγού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς για ο Όμως υπάρχει μια διαφοροποίηση όταν πρόκειται για ζυγό PV καθώς η τάση και η ενεργός ισχύς είναι προκαθορισμένα μεγέθη.
2. Στη περίπτωση ζυγού PV η λύση είναι ελαφρώς διαφορετική. Η τιμή της άεργου ισχύος δεν είναι γνωστή ενώ ταυτόχρονα δεν μπορούμε να την υπολογίσουμε χωρίς να είναι γνωστή η τιμή της τάσης. Οποτε υπολογίζονται τα ρεύματα από τους γειτονικούς ζυγούς, και έπειτα υπολογίζεται η συνολική άεργος ισχύς με βάση το φανταστικό μέρος του υπολογισμού της συνολικής ισχύος (η τάση είναι γνωστή και  $S = VI^*$ ). Συνεπώς κρατάμε το πραγματικό στοιχείο ως έχει και προσθέτουμε το φανταστικό για τον πλήρη υπολογισμό. Έτσι υπάρχουν πλέον όλα τα στοιχεία για τον υπολογισμό της εξίσωσης 6. 2. Όμως η τάση αυτή παραμένει μια μη-τερματική λύση. Κατά την επίλυση της εξίσωσης 6. 2 γίνεται κανονικοποίηση της λύσης για την απορρόφηση μόνο της γωνίας της τάσης και όχι του πλάτους της (γιατί η τάση είναι προκαθορισμένη στους ζυγούς παραγωγής λόγω των ρυθμιστών τάσης στις σύγχρονες γεννήτριες).
3. Οι λύσεις των τάσεων συγκρίνονται με τις προηγούμενες τιμές και υπολογίζεται η απόκλιση πολλαπλασιασμένη με έναν παράγοντα επιτάχυνσης 40%.
4. Επανάληψη των παραπάνω βημάτων έως ότου το σφάλμα της επίλυσης να έχει μικρότερη τιμή από την επιθυμητή απόκλιση που επιλέγεται από το χρήστη.

Ένα αναλυτικό σχήμα του τρόπου υπολογισμού των τάσεων μπορεί να φανεί στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.3 Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό των τάσεων κατά την ανάλυση ροών φορτίου.

Προφανώς κατά την επίλυση μεγάλων συστημάτων μια επαναληπτική διαδικασία η οποία συνεχίζει μέχρι να επιτευχθεί μικρό σφάλμα, απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Γι'αυτό έχει οριστεί και μια επιπλέον μεταβλητή η οποία λέγεται “event”. Ο υπολογισμός των τάσεων λαμβάνει χώρα στο λογισμικό μόνο όταν αυτή είναι ενεργοποιημένη ελαττώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο εκτέλεσης.

Μαζί με την επίλυση των επιμέρους τάσεων για τον κάθε ζυγό, υπολογίζεται και βήμα βήμα η απόκριση της κάθε μονάδας παραγωγής. Σε κάθε επαναληπτικό βήμα του λογισμικού, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των υπολογισμένων τάσεων και των υπολοίπων μεγεθών των μονάδων παραγωγής. Αυτό σημαίνει πως τα μεταβατικά φαινόμενα που μπορεί να συμβαίνουν σε κάποιο

ζυγό, μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα φαινόμενα που συμβαίνουν σε κάποιον άλλο. Δηλαδή μια διαταραχή του αέρα σε μια μονάδα ανεμογεννητριών, κάποιο βραχυκύκλωμα ή πτώση τάσης σε έναν ζυγό έχει την ικανότητα να εμφανίσει μεταβατικά φαινόμενα σε κάποια απομακρυσμένη μονάδα παραγωγής. Παραδείγματα τέτοιου είδους θα προσομοιωθούν σε παρακάτω ενότητα.

#### 6.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Στο εσωτερικό του λογισμικού, για κάθε μορφή επανάληψης επιλύονται διαφορικές εξισώσεις όπως αυτές που αναφερθήκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων που επιλέχθηκε είναι η μέθοδος Runge-Kutta 4ης τάξης[18].

Μια κανονική διαφορική εξίσωση χαρακτηρίζεται από την τιμή  $\frac{dy}{dx}$  στη μορφή  $x$  και  $y$  όπως επίσης και μια αρχική συνθήκη (Παραδείγματος χάρη τη  $y(0)$ ). Οπότε δίνεται ότι

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), y(0) = y_0 \quad (6.4)$$

Το ζητούμενο είναι να βρεθεί η τιμή μιας άγνωστης συνάρτησης  $y$  σε δεδομένο σημείο  $x$ . Η μέθοδος Runge-Kutta 4<sup>ης</sup> τάξης βρίσκει μια πολύ καλή προσεγγιστική τιμή της  $y$  για ένα δεδομένο  $x$ . Ωστόσο μόνο πρώτης τάξης κανονικές διαφορικές εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν με τη μέθοδο αυτή. Παρακάτω παρουσιάζεται η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής  $y_{n+1}$  από τη προηγούμενη τιμή  $y_n$ . Η τιμή του  $n$  μπορεί να είναι  $0, 1, 2, 3, \dots, \frac{x-x_0}{h}$  όπου  $h$  είναι το ύψος του βήματος και ισχύει ότι  $x_{n+1} = x_0 + h$ . Γενικά όσο πιο μικρό ύψος βήματος έχουμε τόσο πιο ακριβές θα είναι το μοντέλο των υπολογισμών[18].

Ισχύει ότι

$$\begin{cases} K_1 = h f(x_n, y_n) \\ K_2 = h f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{K_1}{2}\right) \\ K_3 = h f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{K_2}{2}\right) \\ K_4 = h f(x_n + h, y_n + K_3) \end{cases} \quad (6.5)$$

Και

$$y_{n+1} = y_n + \frac{K_1}{6} + \frac{K_2}{3} + \frac{K_3}{3} + \frac{K_4}{6} + O(h^5) \quad (6.6)$$

Συνεπώς ο τύπος της εξίσωσης 6.3 υπολογίζει την επόμενη τιμή  $y_{n+1}$  χρησιμοποιώντας το τρέχον  $y_n$  αθροίζοντας τον σταθμισμένο μέσο όρο των τεσσάρων προσανξήσεων ( $K$ )[18].

- Το  $K_1$  είναι η αύξηση που βασίζεται στην κλίση στην αρχή του διαστήματος χρησιμοποιώντας το  $y$ .

- Το K2 είναι η αύξηση που βασίζεται στη κλίση στο μέσο σημείο του διαστήματος χρησιμοποιώντας το  $y + h \frac{K_1}{2}$ .
- Το K3 είναι και πάλι το βήμα που βασίζεται στη κλίση στο μεσαίο σημείο χρησιμοποιώντας το  $y + h \frac{K_1}{2}$ .
- Το K4 είναι η αύξηση που βασίζεται στη κλίση στο τέλος του διαστήματος χρησιμοποιώντας  $y + h K_3$  [18].

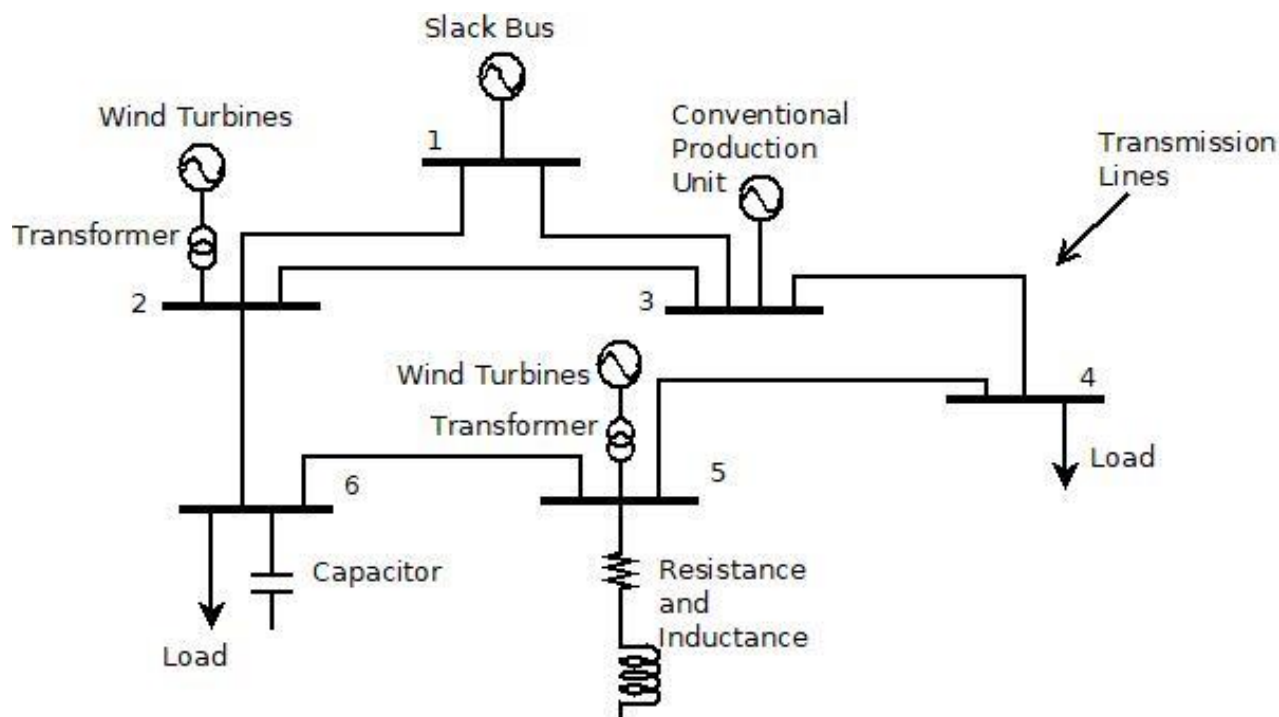
Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιήθηκε σημαντικά στην επίλυση του συστήματος των εξισώσεων των ρευμάτων των σύγχρονων γεννητριών που υπάρχουν στις συμβατικές μονάδες και στις ανεμογεννήτριες του συστήματος.

## 6.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΙ ΖΥΓΩΝ

Το σύστημα προς επίλυση αποτελείται από έξι ζυγούς ως εξής

1. Εξ'ορισμού, θεωρούμε πως ο πρώτος ζυγός είναι ο ζυγος ταλάντωσης. Εκεί ισχύει ότι η τάση έχει τιμή ίση με  $V_1 = 1 < 0^\circ pu$ .
2. Ο ζυγός 2 αποτελείται από ένα αιολικό πάρκο 7 ανεμογεννητριων ακριβως όπως περιγράφηκαν και στο αντίστοιχο κεφάλαιο.
3. Στο ζυγό 3 υπάρχει μια συμβατική μονάδα με σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης 50MVA , 6.6kV με μικρή ροπή αδράνειας για την έμφαση τις ευστάθειας. Η ρύθμιση της αφορά τροφοδότηση ισχύος στο ζυγό S = 20MVA με συντελεστή ισχύος 0.8 επαγωγικό.
4. Στο ζυγο 4 υπάρχει ένα φορτίο σταθερής ισχύος  $S_{D4} = 0.6 + j0.3 pu$ .
5. Στο ζυγο 5 υπάρχει ένα φορτίο RL σύνθετης αντίστασης  $2+1j$  και ένα αιολικό πάρκο με 10 ανεμογεννήτριες ίδιου τύπου με το ζυγό 2.
6. Στο ζυγό 6 υπάρχει φορτίο σταθερής ισχύος  $S_{D5} = 0.5 + j0.2 pu$  και πυκνωτής αντιστάθμισης με σύνθετη αγωγιμότητα  $-0.909j$ .





Εικόνα 6.4 Ηλεκτρικό σύστημα έξι ζυγών.

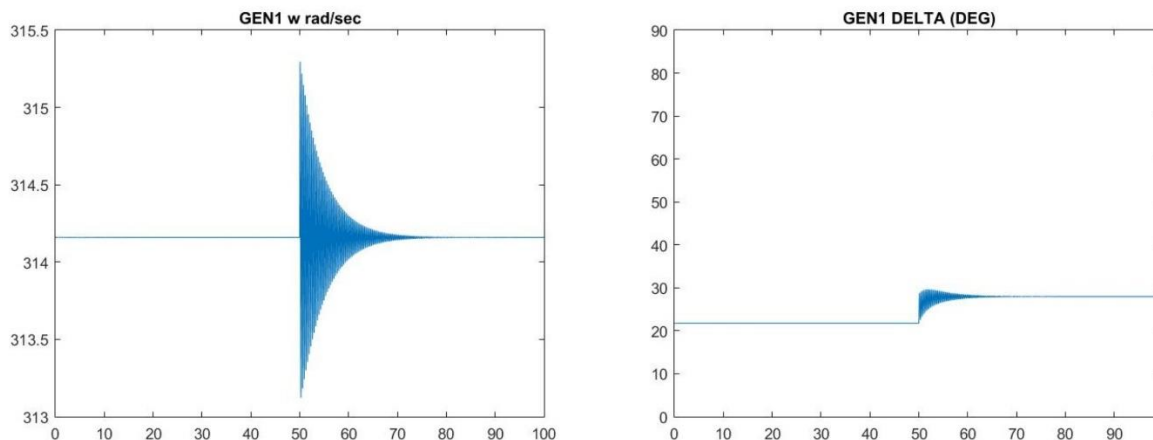
Πάνω σε αυτό το ηλεκτρικό δίκτυο ασκούνται οι υπολογισμοί που έχουν παρουσιαστεί στη παρούσα εργασία. Η προσομοίωση γίνεται σε χρόνο 100 δευτερόλεπτων και εμφανίζονται τρεις διαφορετικές διαταραχές σε τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις.

- Η πρώτη διαταραχή αφορά την αποκρίση των μονάδων κατά την αύξηση της απαιτούμενης ισχύος της συγχρονης γεννητριας του ζυγού 3 από τα 16 MW στα 20MW.
- Η δεύτερη αφορά την ακαριαία μεταβολή του ανέμου από τα 10m/s στα 15m/s.
- Η τρίτη διαταραχή αφορά μια μεγάλη πτώση τάσης μικρής διάρκειας στον έκτο ζυγό. Πιο συγκεκριμένα η πτώση είναι στα 0.5V pu και έχει μικρή διάρκεια.

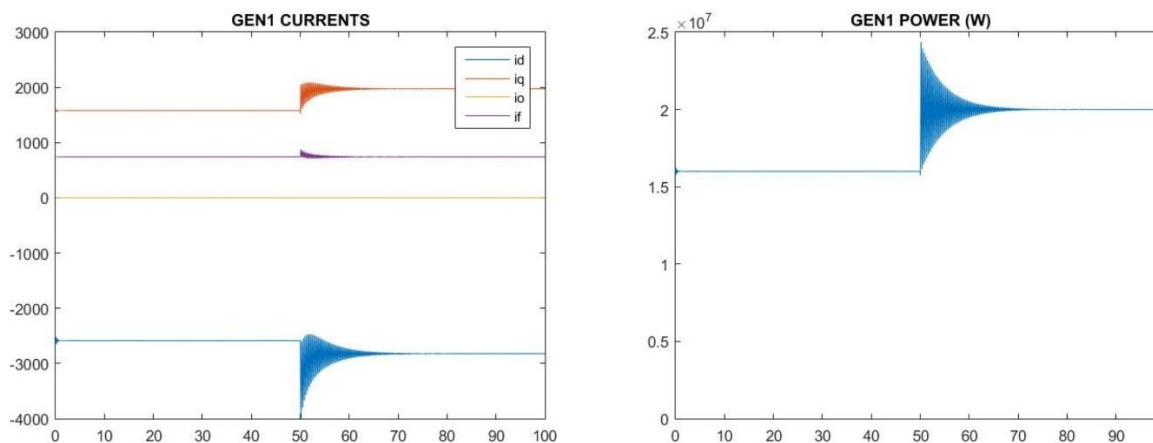
Πρέπει να σημειωθεί πως στις παρακάτω προσομοιώσεις, το αρχικό στάδιο αποτελεί μια μετάβαση εξομάλυνσης και αρχικοποίησης των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου και δεν λαμβάνεται υπόψιν. Επίσης οι μονάδες ανεμογεννητριών και στα δύο αιολικά πάρκα είναι οι ίδιες αλλά σε διαφορετικό πλήθος. Τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων αφορούν τις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου στο ζυγό 5. Οι προσομοιώσεις γίνονται με τις ίδιες ταχύτητες ανέμου, οπότε και οι τιμές των μεγεθών στις ανεμογεννήτριες του ζυγού 3 θα έχουν μικρή αποκλιση από τις τιμές αυτών του ζυγού 5. Τέλος για να δοθεί μια έμφαση της συμβολής των ανεμογεννητριών στον έλεγχο της εκχυόμενης άεργου ισχύος στο δίκτυο, η κάθε μονάδα ανεμογεννήτριας έχει ρυθμιστεί να απορροφά άεργο ισχύ ίση με 500KVar (όποτε αυτό είναι εφικτό).

### 6.5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΠΟΤΟΜΗ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ.

Σε πρώτο στάδιο θα γίνει η προσομοίωση της απόκρισης των επιμερους μοναδών του συστήματος για μια πιθανή αποτομή αύξηση του ανέμου και στα δυο αιολικά πάρκα. Ακόμα και σε αποτομες μεταβολές πρέπει το σύστημα να εμφανίζει μεγάλη αντοχή καθώς περίπτωση αποσυγχρονισμού της σύγχρονης γεννήτριας ή της μεγάλης φορτώσης των γραμμών μεταφοράς μπορεί να έχει καταστροφικές συνεπειές. Η απόκριση της σύγχρονης γεννήτριας στο ζυγό 3 φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6.5 Γωνιακή ταχύτητα και γωνία ισχύος 'δ' της σύγχρονης γεννήτριας στο ζυγό 3.

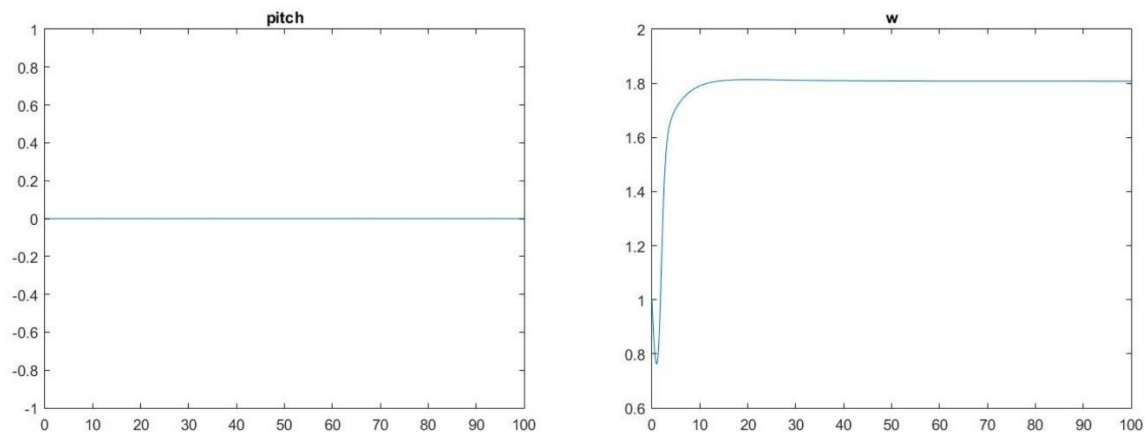


Εικόνα 6.6 Ρεύματα και παραγόμενη ενεργός ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας στο ζυγό 3.

Προφανώς μια αύξηση στη μηχανική ισχύ στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας θα έχει και το ανάλογο αποτέλεσμα στην απόκριση της. Αυξάνοντας τη μηχανική ισχύ από τα 16MW στα 20MW λαμβάνουν χώρα μεταβατικά φαινόμενα όπως αυτά που αναφέρθηκαν και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Η γωνία ισχύος 'δ' αυξάνεται με την ηλεκτρική ισχύ να αντανakλά το μέγεθος της

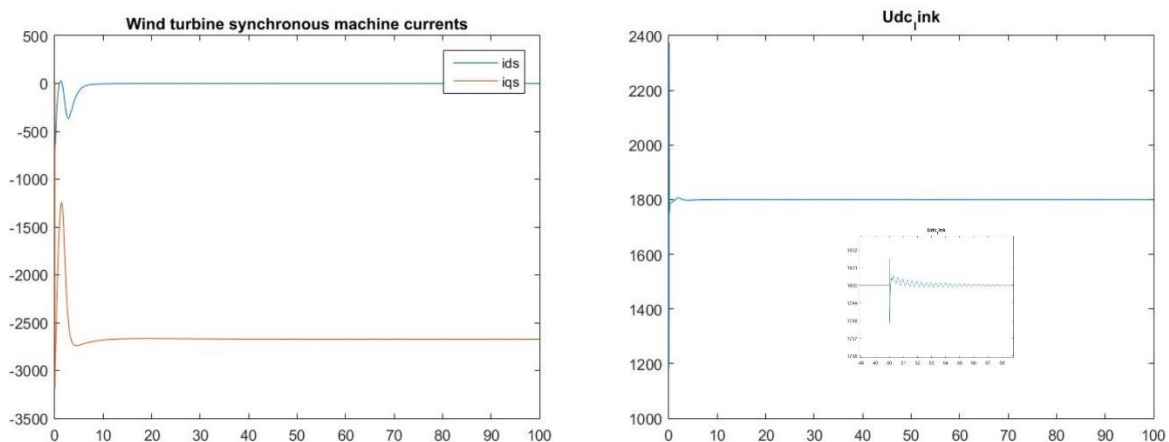
μηχανικής ροπής και να παίρνει και αυτή τη τιμή των 20MW. Σίγουρα μια τέτοια αύξηση δεν είναι αρκετή να αποσυγχρονίσει το σύστημα.

Η κάθε ανεμογεννήτρια στο αιολικό πάρκο του ζυγού 5 θα έχει την παρακάτω απόκριση.



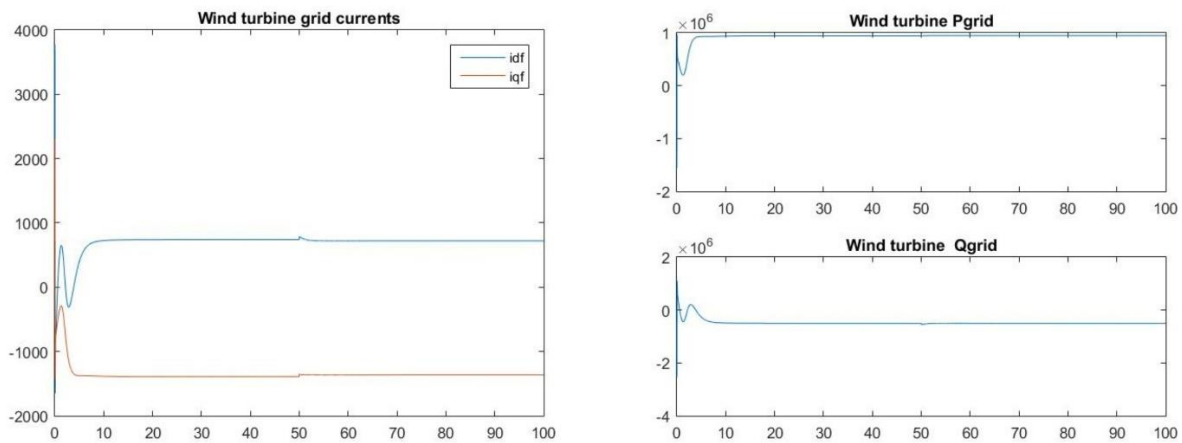
Εικόνα 6.7 Γωνία pitch και γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων της κάθε ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο του ζυγού 5.

Καθώς ο άνεμος δεν έχει μεταβληθεί, η γωνία pitch και η γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων διατηρούν τις τιμές τους.



Εικόνα 6.8 Ρεύματα στάτη της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών και τάση του πυκνωτή στη DC διασύνδεση στη κάθε μονάδα ανεμογεννήτριας του ζυγού 5.

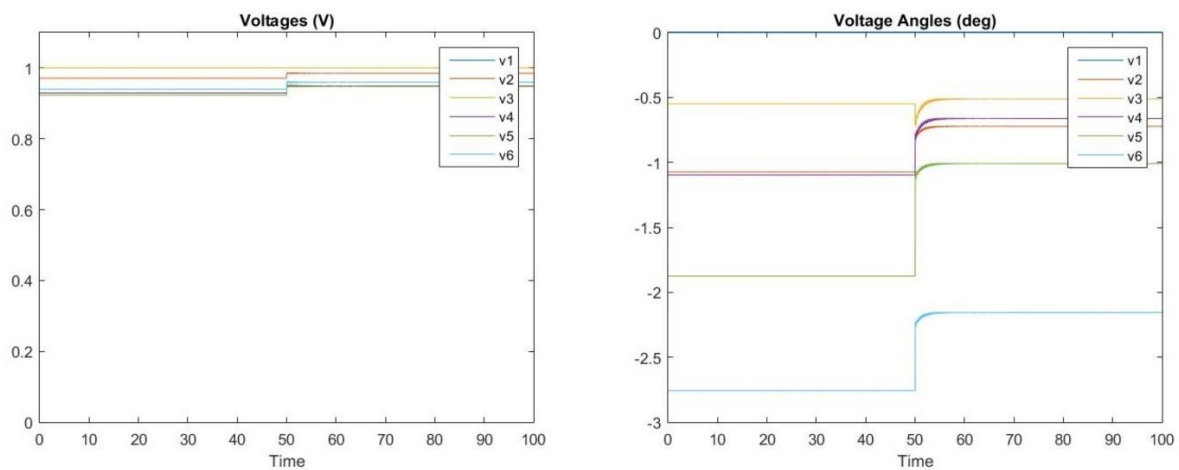
Η αύξηση της παραγωγής στο ζυγό 3 δεν έχει ωθήσει μεταβατικά φαινόμενα στη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών των ανεμογεννητριών.



Εικόνα 6.9 Ρεύματα μαζί με την ενεργό και την αεργο ισχύ που εκχύνονται στο δίκτυο απο τη κάθε ανεμογεννήτρια του ζυγού 5.

Ένα μικρό μεταβατικό φαινόμενο παρουσιάζεται στα ρεύματα και την ισχύ που εκχύνεται στο δίκτυο. Όμως το μέγεθος της μεταβολής είναι αμελητέο.

Τέλος οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών φαίνονται παρακάτω.

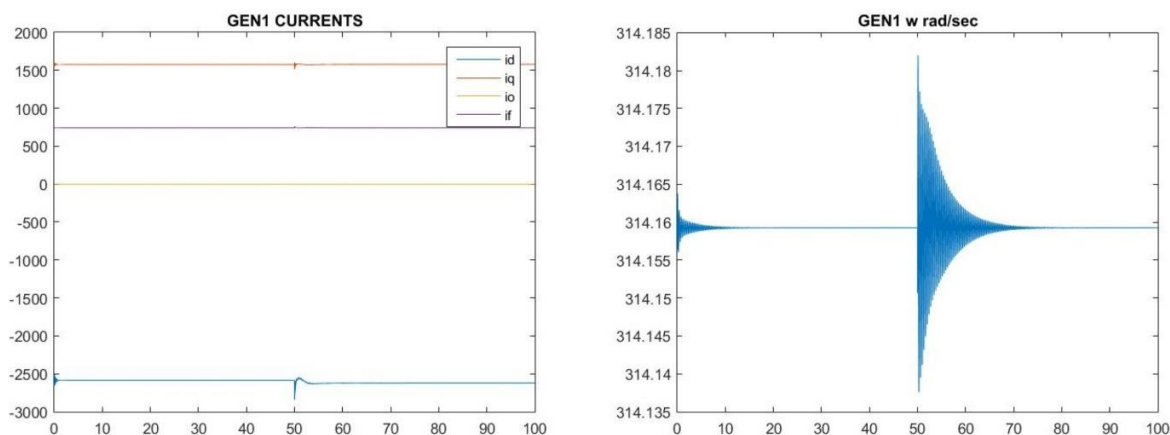


Εικόνα 6.10 Τάσεις και γωνίες τάσεων στους ζυγούς του συστήματος.

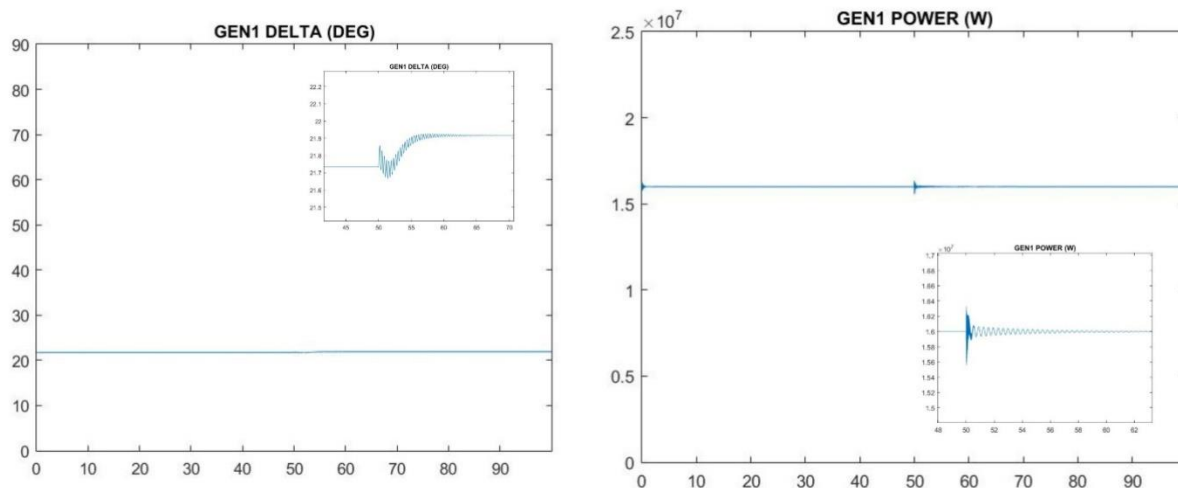
Τα μικρά μεταβατικά φαινόμενα που παρατηρούνται στις ανεμογεννήτριες οφείλονται στη μικρή μεταβολή της τάσης και της γωνίας των ζυγών.

### 6.5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΠΟΤΟΜΗ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ.

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται προσομοίωση των αποτελεσμάτων για μια απότομη αύξηση του ανέμου στα αιολικά πάρκα. Συνεπώς και η έκχυση ισχύος απο τις ανεμογεννήτριες θα αυξηθεί στον αντίστοιχο αλλά επιτρεπτό βαθμό όπως και προβλέπεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Η απόκριση της σύγχρονης γεννήτριας λοιπόν είναι η εξής.



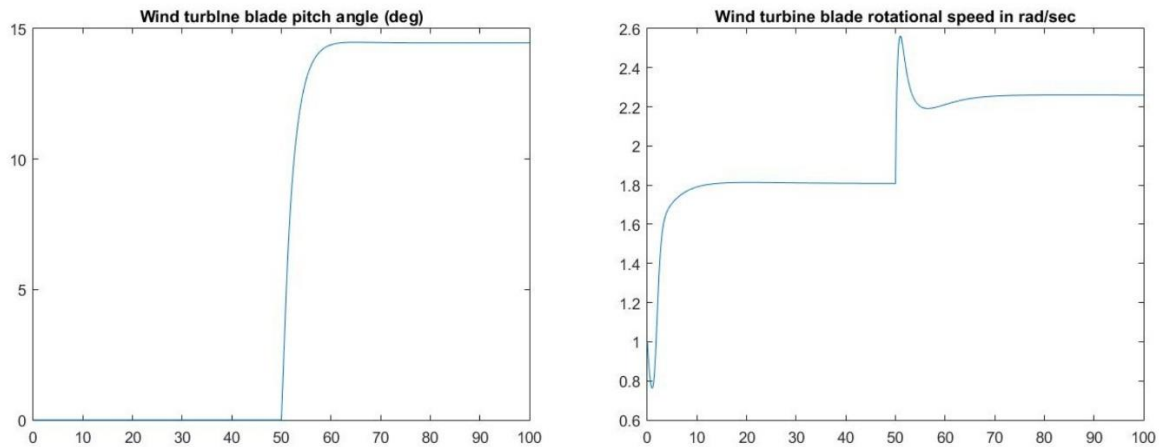
Εικόνα 6.11 Ρεύματα και γωνιακή ταχύτητα της σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης στο ζυγό 3.



Εικόνα 6.12 Γωνία ισχύος 'δ' και παραγόμενη ενεργός ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης στο ζυγό 3..

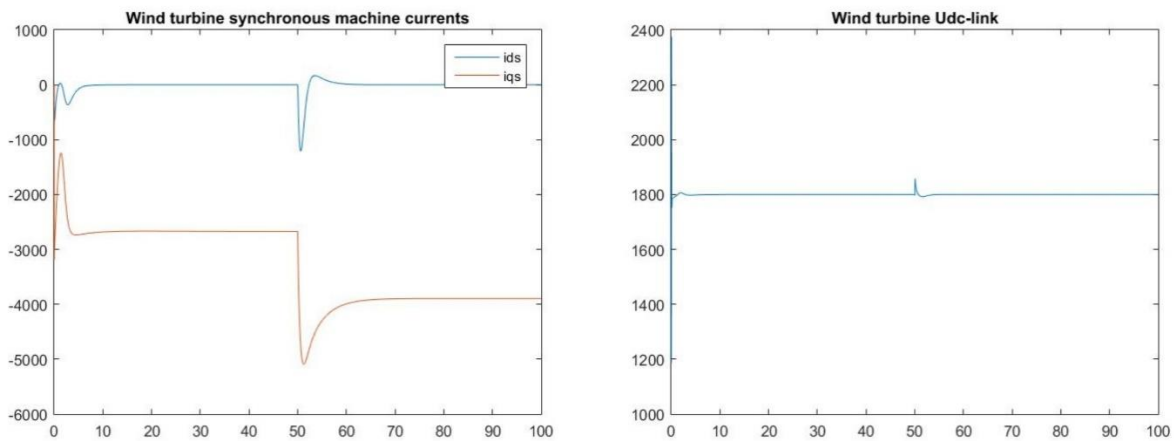
Η αύξηση της παραγωγής απο τα αιολικά πάρκα παρουσιάζει απειροελάχιστες μεταβολές στα μεγέθη της σύγχρονης γεννήτριας ηλεκτρικής διέγερσης του ζυγού 3.

Η απόκριση της κάθε ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο φαίνεται παρακάτω.



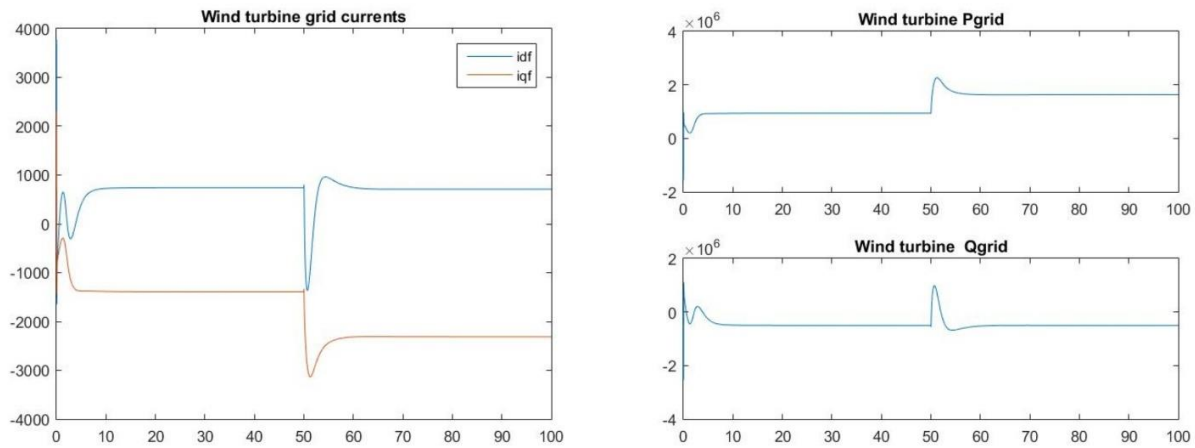
Εικόνα 6.13 Γωνία pitch και γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων της κάθε ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο του ζυγού 5.

Όπως προβλέπεται, η αύξηση της τιμής της ταχύτητας του ανέμου πάνω από την ονομαστική, θα έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της γωνίας των πτερυγίων για την αποφυγή βλαβών και ακραίων φαινομένων. Παρόμοια τροποποίηση συμβαίνει και στη γωνιακή ταχύτητα του άξονα των πτερυγίων όπου η ταχύτητα περιστροφής ρυθμίζεται να είναι ίση με την ονομαστική.



Εικόνα 6.14 Ρεύματα στάτη της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών και τάση του πυκνωτή στη DC διασύνδεση στη κάθε μονάδα ανεμογεννήτριας του ζυγού 5.

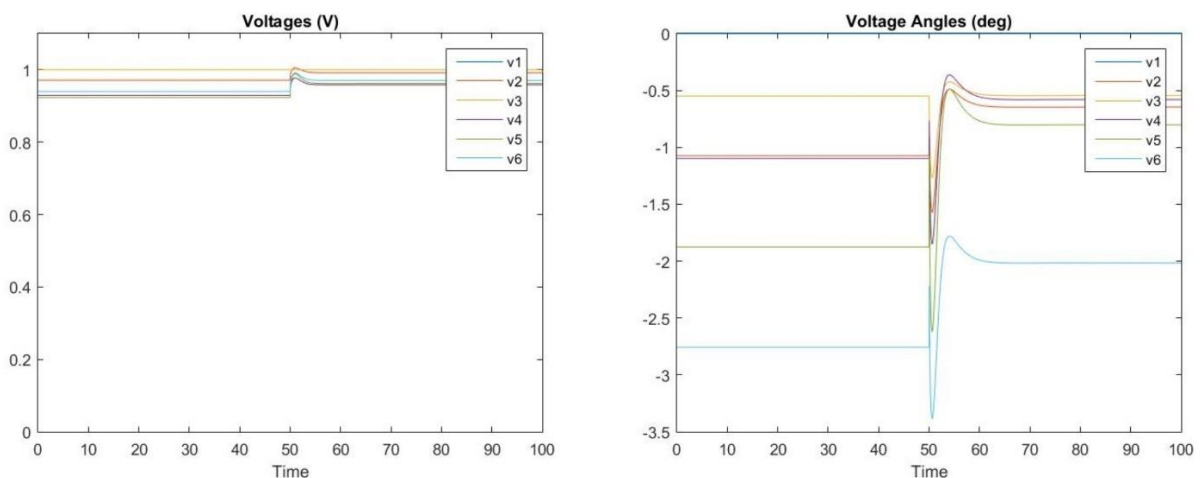
Όπως είναι φυσικό, μια αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου αφορά άμεσα τις μονάδες ανεμογεννητριών και εμφανίζονται μικρές και απόλυτα φυσιολογικές μεταβολές στο ρεύμα της σύγχρονης γεννήτριας των ανεμογεννητριών αλλά και στη τάση της DC διασύνδεσης.



Εικόνα 6.15 Ρεύματα μαζί με την ενεργό και την αεργο ισχύ που εκχύνονται στο δίκτυο απο τη κάθε ανεμογεννήτρια του ζυγού 5.

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου αντιλαμβάνονται έγκαιρα της μεταβολές στη DC διασύνδεση αποδίδοντας την αποθηκευμένη ενέργεια του πυκνωτή στο δίκτυο με απόλυτο έλεγχο των τιμών της.

Τέλος οι τάσεις των ζυγών και οι γωνίες τους φαίνονται στη παρακάτω εικόνα.



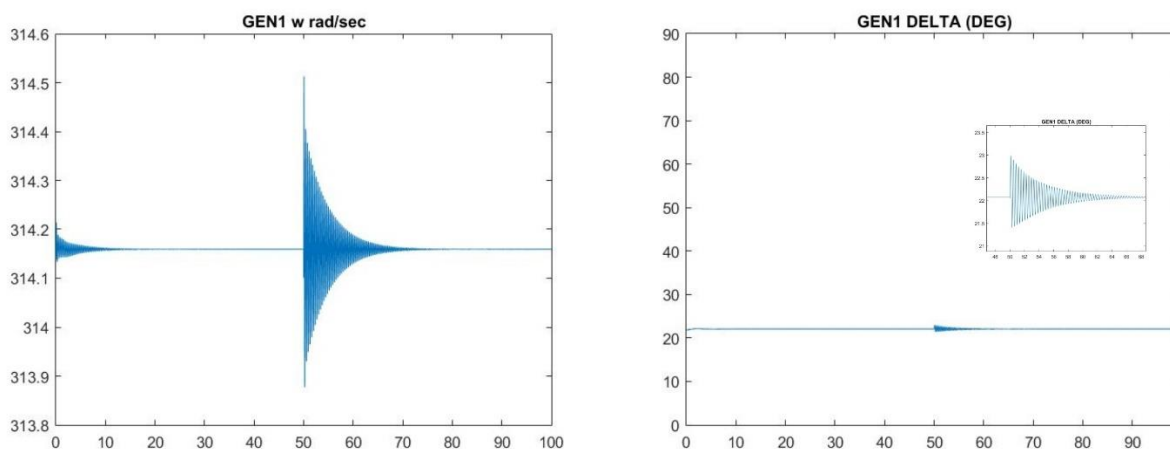
Εικόνα 6.16 Τάσεις και γωνίες τάσεων στους ζυγούς του συστήματος.

Η αλλαγή της ποσότητας της παραγόμενης ισχύος έχει άμεσο αντίκτυπο στις τάσεις και τις γωνίες των ζυγών χωρίς όμως να προκαλείται οποιοδήποτε πρόβλημα σε καμία μονάδα.

### 6.5.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΗ ΠΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΖΥΓΟ 6.

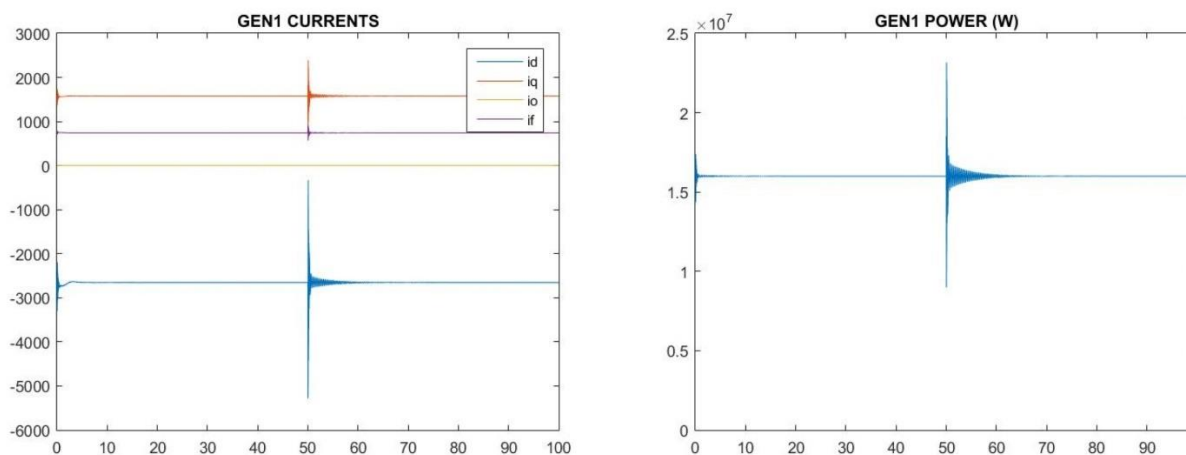
Ένα καλό παράδειγμα για τη διάκριση της ευστάθειας μπορεί να αποτελεί μια μεγάλη πτώση τάσης σε κάποιο απομακρυσμένο ζυγό απο τις ανεμογεννήτριες. Στο στάδιο αυτό θα γίνει προσομοίωση μιας προσωρινής πτώσης τάσης στα 0.5V pu στον έκτο ζυγό του συστήματος όπου στεγάζεται ένα φορτίο σταθερής ισχύος και ένας πυκνωτής αντιστάθμισης. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω.

Η απόκριση της σύγχρονης γεννήτριας είναι η εξής.



Εικόνα 6.17 Γωνιακή ταχύτητα και γωνία ισχύος 'δ' της σύγχρονης γεννήτριας στο ζυγό 3.

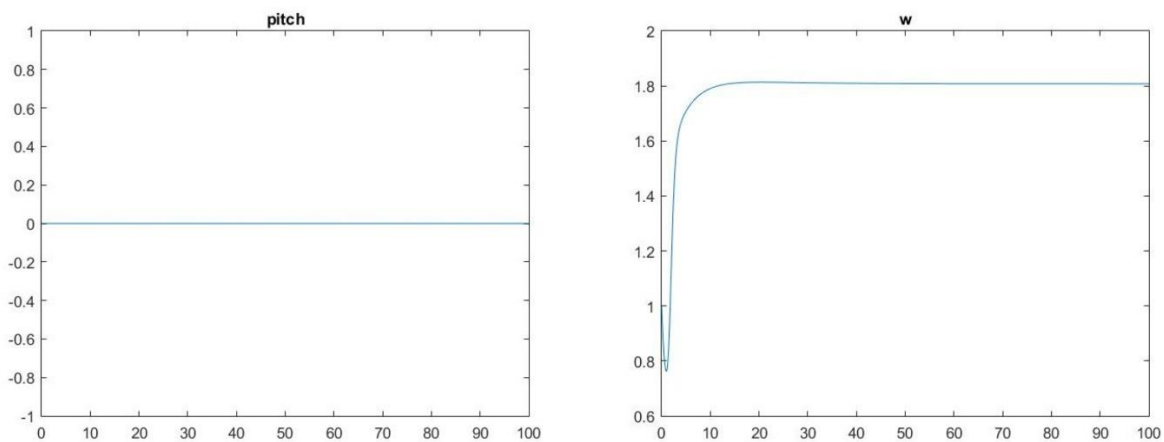
Είναι αναμενόμενο μία πτώση τάσης να έχει επιρροή στα μεγέθη της κάθε μονάδας του συστήματος. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 6.17 και 6.18 μία πτώση τάσης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αλλά ευτυχώς το σύστημα έχει την ικανότητα να επανέλθει έγκαιρα στις κανονικές συνθήκες μετά την εκκαθάριση της πτώσης τάσης.



Εικόνα 6.18 Ρεύματα και παραγόμενη ενεργός ισχύς της σύγχρονης γεννήτριας στο ζυγό 3.

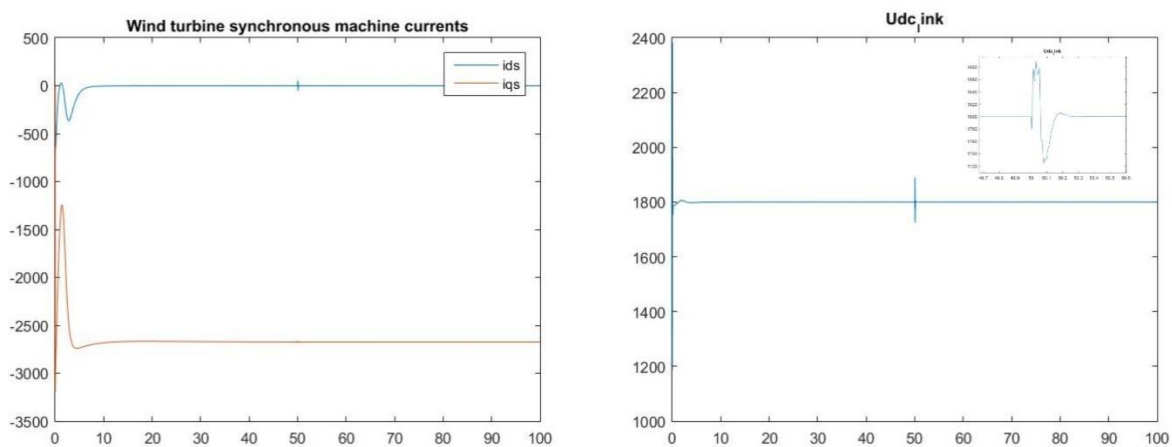


Η απόκριση της κάθε μονάδας ανεμογεννήτριας στο ζυγό 5 φαίνεται παρακάτω.



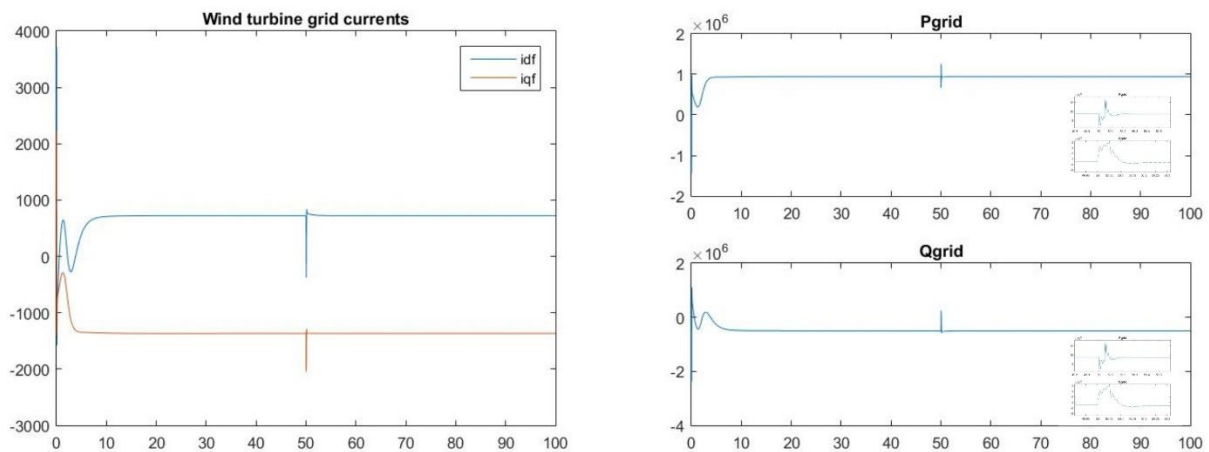
Εικόνα 6.19 Γωνία pitch και γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων της κάθε ανεμογεννήτριας στο αιολικό πάρκο του ζυγού 5.

Καθώς ο άνεμος δεν έχει μεταβληθεί, η γωνία pitch και η γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων διατηρούν τις τιμές τους.



Εικόνα 6.20 Ρεύματα στάτη της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών και τάση του πυκνωτή στη DC διασύνδεση στη κάθε μονάδα ανεμογεννήτριας του ζυγού 5.

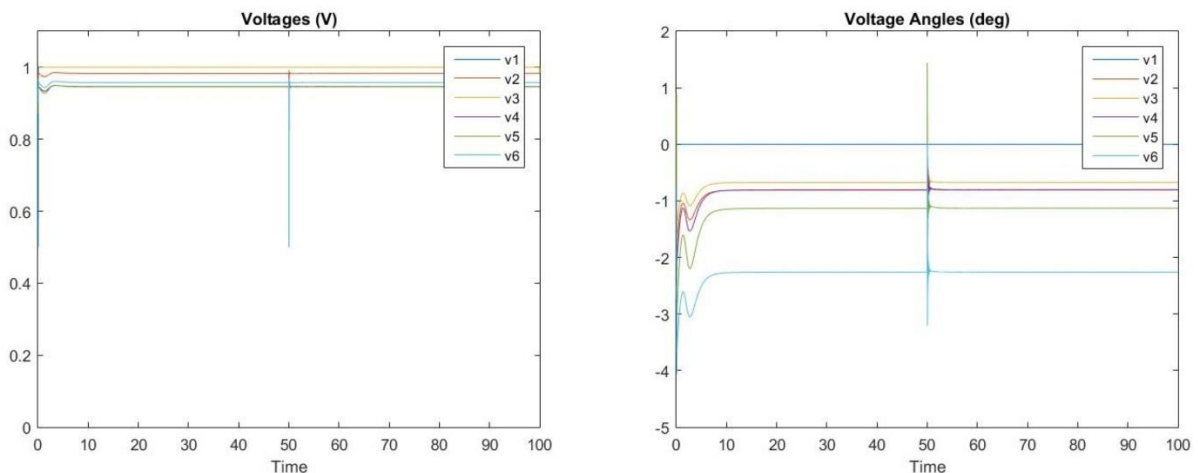
Μία μεγάλη πτώση τάσης μπορεί να προκαλέσει μεταβολές που θα φτάσουν ακόμα και στη σύγχρονη γενήτρια μονίμων μαγνητών των ανεμογεννήτριων. Όμως χάρη στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου οι μεταβολές αυτές δεν είναι ικανές να προκαλέσουν ζημιές στη μηχανή.



Εικόνα 6.21 Ρεύματα μαζί με την ενεργό και την αεργο ισχύ που εκχύνονται στο δίκτυο απο τη κάθε ανεμογεννήτρια του ζυγού 5.

Ελαφρώς μεγαλύτερες μεταβολές παρουσιάζουν τα ρεύματα του δικτύου και προφανώς ακολουθούν η ενεργός και η άεργος ισχύς που εκχύνονται σ'αυτό.

Τέλος η τάσεις και οι γωνίες των τάσεων των ζυγών του συστήματος παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.22 Τάσεις και γωνίες τάσεων στους ζυγούς του συστήματος.

Είναι λογικό μια πτώση τάσης να έχει ακολουθία από ολόκληρο το ηλεκτρικό δίκτυο όπως και φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Όμως χάρη στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου των μονάδων παραγωγής αλλά και η ύπαρξη του ζυγού ταλάντωσης, παρουσιάζεται μεγάλη αντοχή και σταθερότητα στη ροή της ισχύος.

## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

### 7.1 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε μια τελική ανάλυση, τα δίκτυα ηλεκτρικής ενεργείας έχουν ταχυστάτους ρυθμούς εξέλιξης αλλά και απαιτήσεων. Η χρήση του ηλεκτρισμού έχει κατακόρυφα ανοδικές τάσεις και οι προκλήσεις είναι πολλές. Ο άνθρωπος συνεχώς εισάγει νέες μεθόδους παραγωγής με τις ανεμογεννήτριες να είναι μια από αυτές. Καθώς το δίκτυο δέχεται μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος από ΑΠΕ κρίνεται αναγκαίος ο έλεγχος της ευστάθειας αυτού και της αντοχής των επιμέρους συστημάτων του. Καθώς το βασικό μέρος του ηλεκτρικού δικτύου αποτελείται από σύγχρονες γεννήτριες, πρέπει τα συνδεδεμένα συστήματα να μην έχουν μεγάλη επιρροή σ'αυτες αλλά αντιθέτως να ελαφρύνουν την καταπόνηση μονάδων ενώ ταυτόχρονα εξυπηρετούν πλήρως τις προσδοκίες τους χωρίς πολλούς συμβιβασμούς. Όσον αφορά τις μονάδες ανεμογεννητριών, αυτές πρέπει να μην επηρεάζουν την ευστάθεια και την ακεραιότητα τους σε περιπτώσεις ριπών άνεμου, αλλαγών στις απαιτήσεις των φορτίων αλλά και πιθανών βραχυκυκλωμάτων. Το λογισμικό που υλοποιήθηκε στην εργασία αυτή υπολογίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τις αποκρίσεις και τη μεταβατική ευστάθεια των επιμέρους συστημάτων και προσομοιώνει τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων για τα δεδομένα που δίνει ο χρήστης.

### 7.2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Όπως και κάθε άλλο μοντέρνο πρόγραμμα, μια γραφική διεπαφή με το χρήστη θα είναι πολύ χρήσιμη καθώς η λειτουργία με κώδικα μπορεί να γίνει αρκετά πολύπλοκη. Σαν επιπλέον χαρακτηριστικά, στο λογισμικό μπορεί να προστεθεί οτιδήποτε καθώς είναι κατασκευασμένο με κώδικα ο οποίος αλλάζει από το χρήστη. Υπάρχουν πολλές και διάφορες ιδέες που μπορούν να προστεθούν με τις πιο εμφανείς να παρουσιάζονται παρακάτω:

- Γραφικό περιβάλλον διεπαφής με το χρήστη.
- Βέλτιστη λειτουργία μονάδων για την εύρεση του οικονομικότερου σημείου λειτουργίας με βάση το κόστος.
- Υλοποίηση ακριβέστερων μοντέλων για τους μετασχηματιστές με αλλαγή βέσης ισχύος-τάσης.
- Υλοποίηση ανεμογεννήτριας με σύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικής διέγερσης. Στη περίπτωση αυτή προστείνεται ο έλεγχος του ρεύματος διέγερσης με τους ελεγκτές να ρυθμίζουν την τάση για τιμές που δεν παράγεται άεργος ισχύς από τη σύγχρονη γεννήτρια. Επιτρέπεται έτσι η χρήση ενός απλού ανορθωτή διόδων στη πλευρά της μηχανής.
- Τοποθέτηση μεταβλητού βήματος στους υπολογισμούς για διαφορετικά στιγμιότυπα
- Αυτόματος συντονιστής των συντελεστών για τους ελεγκτές με σκοπό τη πιο στιβαρή αντοχή των συστημάτων σε αστάθειες.
- Γραφική ανάλυση σε πραγματικό χρόνο.

Σε κάθε περίπτωση από τις παραπάνω, τα επιμέρους συστήματα παρέχονται και ως μεμονωμένες δομές αυξάνοντας έτσι τις προοπτικές και τους πιθανούς τρόπους λειτουργίας.

- [1] “Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας - Βικιπαίδεια.” [https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες\\_πηγές\\_ενέργειας](https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας) (accessed Sep. 04, 2021).
- [2] “Wind turbine - Wikipedia.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine) (accessed Sep. 04, 2021).
- [3] Σ. Η. Μηχανικών, “Συμβολή Στην Προσομοίωση Και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια Για Την Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδυνάμων Μοντέλων Φώτης Δ . Κανέλλος,” 2003.
- [4] H. Allamehzadeh, “Wind energy history, technology and control,” *2016 IEEE Conf. Technol. Sustain. SusTech 2016*, pp. 119–126, 2017, doi: 10.1109/SusTech.2016.7897153.
- [5] G. Deskos, “Numerical simulations of wind turbine wakes,” p. 34, 2019, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/332180389\\_Numerical\\_simulations\\_of\\_wind\\_turbine\\_wakes](https://www.researchgate.net/publication/332180389_Numerical_simulations_of_wind_turbine_wakes).
- [6] F. D. Kanellos and N. D. Hatziaargyriou, “Optimal control of variable speed wind turbines in islanded mode of operation,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 4, pp. 1142–1151, 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2048216.
- [7] Γ. Μάργαρης, “Μοντελοποίηση Ανεμογεννητριών Για Τη Μελέτη Δυναμικών Φαινομένων Σε Συνθήκες Αυξημένης Αιολικής Διείσδυσης,” 2011, [Online]. Available: <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/6161/1/PD2012-0002.pdf>.
- [8] I. Y. F. Lun and J. C. Lam, “A study of Weibull parameters using long-term wind observations,” *Renew. Energy*, vol. 20, no. 2, pp. 145–153, 2000, doi: 10.1016/S0960-1481(99)00103-2.
- [9] M. Y. E. Echchhibat, “An adapted method for a small wind turbine to extract the optimal power,” vol. 16, no. November, 2017.
- [10] Βουρνάς Κ. and Κονταξής Γ., *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Πρώτη έκδο. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 2010.
- [11] Γ. Β. Γιαννακόπουλος and Ν. Α. Βοβός, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Πρώτη Έκδο. Πάτρα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ, 2012.
- [12] Ν. Α. Βοβός and Γ. Β. Γιαννακόπουλος, *Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Β΄ Έκδοση. Πάτρα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ, 2017.
- [13] “Difference Between Stator & Rotor (with Comparison chart) - Circuit Globe.” <https://circuitglobe.com/difference-between-stator-and-rotor.html> (accessed Oct. 17, 2021).
- [14] “DC voltage to rotor of synchronous generator - Electrical e-Library.com.” <https://www.electricalibrary.com/en/2019/10/01/dc-voltage-to-rotor-of-synchronous-generator/> (accessed Oct. 09, 2021).
- [15] N. Ranaweera, “Development and Experimental Testing of a Speed Controlled PMSM Drive Using PSIM Visual Programming Environment K . M . Narmada Damayanthi Ranaweera,” no. January, pp. 0–118, 2021, doi: 10.13140/RG.2.2.26370.71361.
- [16] “Rotor (electric) - Wikipedia.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_\(electric\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rotor_(electric)) (accessed Oct. 09, 2021).
- [17] “Choosing the Best Vibration Sensor for Wind Turbine Condition Monitoring | Analog Devices.” <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/choosing-the-best-vibration-sensor-for-wind-turbine-condition-monitoring.html> (accessed Oct. 09, 2021).
- [18] “Runge–Kutta methods - Wikipedia.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Runge–Kutta\\_methods](https://en.wikipedia.org/wiki/Runge–Kutta_methods) (accessed Oct. 21, 2021).

